

**EVALUACIÓN DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN PARA
MONITOREO DE PRECIPITACIONES EN ZONAS URBANAS**

LILIA ROSA ORTEGA GONZÁLEZ



UNIVERSIDAD DE LA COSTA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

2021

**EVALUACIÓN DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN PARA UNA RED
INALÁMBRICA DE MONITOREO DE PRECIPITACIONES EN ZONAS
URBANAS**

LILIA ROSA ORTEGA GONZÁLEZ

**PROYECTO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

TUTOR

PhD. MELISA ANDREA ACOSTA COLL

TUTOR

MSc. GABRIEL DARIO PIÑERES ESPITIA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

2021

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

Barranquilla, julio del 2021

Agradecimientos

A Dios y la Virgen María.

Por llenarme de su amor, su paz y darme la fortaleza necesaria para cumplir mis sueños.

A mis padres.

Por su apoyo incondicional en todos mis proyectos, ser mi razón y mi guía a todo momento.

Finalmente, a mis tutores los ingenieros Melisa Acosta y Gabriel Piñeres, por su tiempo, paciencia y dedicación en este proyecto.

Resumen

Las redes de monitoreo de precipitaciones son elementos claves para la elaboración de alertas y modelos de predicción para las comunidades que corren el riesgo de sufrir inundaciones durante los episodios de precipitaciones de alta intensidad. Actualmente, la mayoría de estas redes envían la medición de las precipitaciones a un centro de datos en tiempo real utilizando protocolos de comunicación inalámbrica, evitando así los desplazamientos al lugar de la medición. Un caso de aplicación de esto es un Sistema de Alerta Temprana (SAT) para inundaciones repentinas pluviales desarrollado en Barranquilla, el cual utilizaba el protocolo GPRS para enviar datos en tiempo real de medición de pluviómetros a un servidor web para su posterior procesamiento; sin embargo, este protocolo presenta alto consumo energético y también elevados costos de mantenimiento. En el presente trabajo se realiza una evaluación de tres protocolos de comunicación inalámbrica de baja potencia, Zigbee, LoRaWAN y Sigfox, para determinar cuál es el más adecuado para aplicar a un sistema de alerta temprana que monitorea precipitaciones en la ciudad de Barranquilla. Las métricas estipuladas de evaluación son las características del perfil de enlace, consumo energético y costos de los dispositivos para la implementación del sistema. Para realizar la evaluación se diseñó y caracterizó una red de sensores inalámbricos, la cual se analizó haciendo uso de la herramienta de software libre Radio Mobile; esta herramienta permitió determinar el rendimiento para cada protocolo de comunicación, teniendo en cuenta los puntos de medición implementados con la red GPRS del anterior SAT. Los resultados finales de la simulación muestran al protocolo LoRaWAN como una alternativa viable y de buen rendimiento.

Palabras clave: monitoreo de precipitaciones, LoRaWAN, Zigbee, Sigfox, Radio Mobile

Abstract

Rainfall monitoring networks are key elements in the development of warnings and predictive models for communities at risk of flooding during high intensity rainfall events. Currently, most of these networks send the rainfall measurement to a data center in real time using wireless communication protocols, thus avoiding travel to the measurement site. An application case of this is an Early Warning System (EWS) for pluvial flash floods developed in Barranquilla, which used the GPRS protocol to send real-time rain gauge measurement data to a web server for further processing; however, this protocol has high energy consumption and high maintenance costs. In the present work, an evaluation of three low power wireless communication protocols, Zigbee, LoRaWAN and Sigfox, is carried out to determine which one is the most suitable to be applied to an early warning system that monitors rainfall in the city of Barranquilla. The stipulated evaluation metrics are the characteristics of the link profile, energy consumption and costs of the devices for the implementation of the system. To perform the evaluation, a wireless sensor network was designed and characterized, which was analyzed using the free software tool Radio Mobile; this tool allowed determining the performance for each communication protocol, taking into account the measurement points implemented with the GPRS network of the previous SAT. The final results of the simulation show the LoRaWAN protocol as a viable alternative with good performance.

Keywords: rainfall monitoring, LoRaWAN, Zigbee, Sigfox, Radio Mobile

Contenido

Lista de tablas y figuras	9
Tablas	9
Figuras	10
Introducción	12
1. Planteamiento del Problema	15
1.1 Formulación del problema	16
2. Objetivos	17
2.1 Objetivo General	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3. Justificación	18
4. Alcance	20
5. Fundamentación Teórica	21
5.1 Monitoreo de precipitaciones	21
5.2 Redes inalámbricas de sensores.	22
5.3 Tecnologías inalámbricas de comunicación para WSN	27
5.3.1 Protocolo Zigbee	31
5.3.2 Protocolo LoRaWAN	33
5.3.3 Protocolo Sigfox	37
6. Estado Del Arte	40
6.1 Redes inalámbricas de monitoreo de precipitaciones	41

EVALUACIÓN DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	8
6.2 Sistemas de alerta temprana en Barranquilla	43
6.3 Diseño de redes y simulación en el software Radio Mobile.	44
7. Metodología	46
7.1 Diseño y desarrollo de una red inalámbrica para monitoreo de precipitaciones	48
7.2 Arquitectura y parámetros de red	50
7.3 Diseño y simulación de radioenlaces	57
8. Análisis y Evaluación de Resultados	64
8.1 Análisis de comunicación de los Radioenlace	64
8.2 Análisis energético	68
8.3 Análisis de costos	69
9. Conclusiones	72
9.1 Trabajos futuros	73
Referencias	74

Lista de tablas y figuras**Tablas**

Tabla 1. Características protocolos de comunicación para WSN.	30
Tabla 2. Cadenas de búsqueda de inclusión y exclusión de términos.	40
Tabla 3. Matriz metodológica.	47
Tabla 4. Ubicación puntos de análisis red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones.	50
Tabla 5. Parámetros de comunicación módulos de transmisión nodos sensores.	54
Tabla 6. Características principales gateways seleccionados para cada protocolo.	57
Tabla 7. Parámetros de comunicación perfiles de enlace.	63
Tabla 8. Parámetros de presupuesto de enlace.	66
Tabla 9. Rango de intensidad de la señal de radio recibida.	67
Tabla 10. Parámetros de potencia módulos de transmisión nodos sensores.	68
Tabla 11. Parámetros de potencia Gateway estación base.	69
Tabla 12. Costos dispositivos de comunicación Zigbee, LoRaWAN y Sigfox.	70

Figuras

Figura 1. Red inalámbrica de sensores. Fuente: (Javier et al., 2009).	24
Figura 2. Arquitectura WSN. Fuente: (ITU-T, 2014).	24
Figura 3. Estructura interna de un nodo sensor. Fuente:(ITU-T, 2014).	25
Figura 4. Esquema de la arquitectura de ZigBee. Fuente:(Zand et al., 2012).	32
Figura 5. Clases LoRaWAN. Fuente:(Alliance, 2020).	35
Figura 6. Arquitectura de protocolos Sigfox. Fuente:(Lavric et al., 2019).	38
Figura 7. Distribución red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones.	50
Figura 8. Distribución nodos sensores y estación base.	51
Figura 9. Componentes de hardware nodos sensores red Zigbee.	52
Figura 10. Componentes de hardware nodos sensores red LoRaWAN.	52
Figura 11. Componentes de hardware nodos sensores red Sigfox.	53
Figura 12. Componentes de hardware estación base red Zigbee.	55
Figura 13. Componentes de hardware estación base red LoRaWAN.	55
Figura 14. Componentes de hardware estación base red Sigfox.	56
Figura 15. Propiedades de las unidades Radio Mobile.	58
Figura 16. Configuración topología de red.	59
Figura 17. Propiedades de la red Zigbee.	60
Figura 18. Propiedades de la red LoRaWAN.	60
Figura 19. Propiedades de la red Sigfox.	61
Figura 20. Red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones Radio Mobile.	61

Figura 21. Redes de monitoreo conexión Google Earth - Radio Mobile. 62

Figura 22. Perfiles de enlace red Zigbee. 62

Figura 23. Perfiles de enlace red LoRaWAN. 63

Figura 24. Perfiles de enlace red Sigfox. 63

Introducción

El monitoreo de precipitaciones es un elemento clave para el pronóstico del tiempo y para cualquier análisis de un sistema hídrico (Organización Meteorológica Mundial, 1994). Los pluviómetros son los instrumentos tecnológicos validados que se utilizan para medir las precipitaciones y se necesitan cierta cantidad de ellos para caracterizar las variaciones espacio-temporales en la zona que se desea monitorear (Mendoza, González, Buelvas, & Rueda, 2016).

Para la modelización de inundaciones en zonas urbanas la medición de las precipitaciones es uno de los principales aportes. Estos modelos obtienen sus datos en muchas ocasiones de redes de sensores inalámbricas que utilizan pluviómetros como instrumento de medida; sin embargo, el despliegue de las redes de sensores inalámbricos se enfrenta a más desafíos que los presentados en entornos rurales y suburbanos, debido a que tiene menos línea de visión y un mayor riesgo de interferencia medioambiental (Cama-Pinto et al., 2016).

Las redes de sensores son aplicadas a soluciones como los Sistemas de Alertas Temprana (SAT). En Barranquilla, la Universidad de la Costa desarrolló un sistema de alerta temprana para la detección del peligro de inundaciones pluviales urbanas con un modelo hidrológico e hidráulico (Acosta-Coll, Ballester-Merelo, & Martínez-Peiró, 2018). Dado que la ciudad se construyó sin un sistema de drenaje de aguas pluviales, se forman peligrosas inundaciones repentinas a lo largo de las calles de la ciudad durante los episodios de lluvia intensa, lo que provoca el deterioro de la malla vial, pone en peligro a conductores y peatones e interrumpe la actividad comercial (Acosta Coll, 2013).

El sistema de alerta temprana mencionado proporciona información sobre la intensidad, la velocidad y la profundidad de las crecidas repentinas de un canal de 4,5 km

de longitud de una cuenca no aforada a través de una red mundial de comunicaciones. El sistema consiste en una red de satélites con tres nodos desplegados a lo largo del canal; se alimenta de un sistema fotovoltaico y está compuesto por un pluviómetro, un sumidero y un módulo GPRS para enviar los datos adquiridos. Sin embargo, a pesar de su alta cobertura y potencia de transmisión, la tecnología GPRS consume más energía y requiere altos costos de mantenimiento que otros protocolos de comunicación inalámbrica.

Con el surgimiento del Internet de las Cosas (IoT), las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) se integraron en el ecosistema de tecnologías que se utilizan ampliamente para el monitoreo del medio ambiente (Bonilla, Arturo, & Morles, 2016). En las WSN mencionadas, los nodos interactúan con el medio ambiente a través de sensores para recoger información en tiempo real y transmitirla a una estación base con servidor para su posterior procesamiento (Rueda & Talavera Portocarrero, 2017). Estas redes funcionan con una eficiente comunicación radioeléctrica optimizando el reenvío de paquetes, la velocidad de transmisión y el consumo de energía de los dispositivos conectados (Javier, Pisón, Marcos, & Elías, 2009).

Con base en lo anterior, este proyecto propone evaluar tres tecnologías de comunicación para implementar en una WSN aplicada a un SAT para monitoreo de precipitaciones. Se seleccionaron tres protocolos de comunicación inalámbrica, Zigbee, LoRaWAN y Sigfox, para realizar una evaluación y determinar el más adecuado en términos de perfil de enlace, presupuesto de enlace, consumo energético y costos de implementación.

Para realizar la evaluación, se diseña y caracteriza una red de sensores inalámbricos para cada protocolo de comunicación utilizando el software libre Radio Mobile, teniendo en cuenta los puntos de medición implementados por el SAT con la tecnología GPRS.

A partir de los resultados, la red Sigfox es la que más intensidad de señal de radio recibe y la red LoRaWAN es la que tiene mejor presupuesto de enlace y menos pérdidas por trayecto. En cuanto al consumo de energía, los dispositivos LoRaWAN son más eficientes energéticamente, así como los nodos sensores de la red LoRaWAN son más económicos. Finalmente, el protocolo con mejor rendimiento general fue LoRaWAN, ya que cumple con los requisitos de comunicación, consumo y costo.

1. Planteamiento del Problema

Las altas precipitaciones en la ciudad de Barranquilla ocasionan inundaciones urbanas repentinas formadas por las características de los suelos y las cuencas hidrográficas de algunas calles de la ciudad (Acosta Coll, 2013). A partir de estos sucesos, la Universidad de la Costa desarrolló un sistema de alerta que adquiere la medición de la lluvia solo con la ayuda de un pluviómetro. La información obtenida es procesada con el levantamiento topográfico de toda la cuenca y con base en esto se puede establecer la velocidad y el nivel del agua. Los datos adquiridos son enviados por medio de módems GPRS a una central de datos que procesa la información. Sin embargo, a pesar de su alto grado de cobertura y potencia de transmisión, esta solución requiere altos costos de mantenimiento y mayor gasto energético.

Con el desarrollo actual de las redes de sensores inalámbricas (WSN) se pueden encontrar diversas aplicaciones prácticas en diferentes áreas con requisitos y consideraciones específicas que necesiten diferentes tecnologías. Para cubrir todas estas necesidades y mejorar especificaciones de red anteriores, han surgido nuevas tecnologías ofreciendo soluciones que combinan hardware de bajo costo, excelente cobertura y requisitos de energía extremadamente bajos, que solucionan las limitaciones de las redes Wi-Fi, Bluetooth y GPRS (Sadowski & Spachos, 2020).

Las redes de monitoreo de precipitaciones y las WSN son indispensables para el éxito de cualquier sistema de alerta temprana de crecidas repentinas. El propósito de las redes de monitoreo de precipitaciones es proveer mediciones hidrometeorológicas precisas y en tiempo real, para aportar datos de lluvia a los modelos hidrológicos y apoyar los pronósticos generales del estado del tiempo y la predicción de las crecidas repentinas (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

Hoy en día se pueden encontrar diversos protocolos inalámbricos que permiten comunicaciones de cobertura de área amplia a menor costo y bajo consumo energético, como Zigbee, SigFox, LTE-M, Long Range (LoRa) y Narrow Band (NB)-IoT (Bhoyar, Sahare, Dhok, & Deshmukh, 2019). Con estos protocolos se pueden implementar sistemas para la adquisición de datos remotos y la vigilancia meteorológica, en especial las condiciones climáticas y la medición de precipitaciones de gran importancia para el ciclo hidrológico, fundamental en las diferentes obras de ingeniería civil que se ven afectadas por los factores climáticos y destacan la importancia de las precipitaciones detectadas por redes de monitoreo (Bonilla et al., 2016).

A partir de la problemática presentada se genera la siguiente pregunta:

1.1 Formulación del problema

¿Cuál protocolo de comunicación inalámbrica aplicado a una WSN ofrecería mejor rendimiento en un SAT para monitoreo de precipitaciones?

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar los protocolos de comunicación Zigbee, LoRaWAN y Sigfox, para determinar cuál es el más adecuado en términos de comunicación, consumo energético y costo monetario para la implementación de una red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones en la ciudad de Barranquilla.

2.2 Objetivos Específicos

Caracterizar protocolos de comunicaciones inalámbricas para su aplicación en un sistema de monitoreo de precipitaciones ubicado en una zona urbana de la ciudad Barranquilla.

Desarrollar una red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones de acuerdo con las características de cada protocolo de comunicación establecido.

Evaluar el rendimiento de los protocolos inalámbricos seleccionados teniendo en cuenta el desempeño de la red en términos de comunicación, consumo energético y costos monetarios.

3. Justificación

Las redes de monitoreo hidrometeorológico obtienen información sobre datos utilizados por modelos de predicción para producir distintas guías de alerta e información sobre amenazas (Organización Meteorológica Mundial, 1994). En el caso de las redes de monitoreo de precipitaciones se busca proveer mediciones hidrometeorológicas precisas, para aportar datos de lluvia a los modelos hidrológicos y apoyar los pronósticos generales del estado del tiempo y la predicción de las crecidas repentinas.

Existen diferentes sistemas que emplean GSM/GPRS como protocolo de comunicación para la implementación de redes de monitoreo de precipitaciones. Sin embargo, estos sistemas presentan alto consumo energético por su principio de funcionamiento y elevados costos de mantenimiento (Acosta-Coll et al., 2018).

Tecnologías como Sigfox, LoRa y Zigbee plantean una solución a esta necesidad, permitiendo enlaces inalámbricos a gran rango con consumo de energía moderado. Estas tecnologías inalámbricas se están popularizando en las aplicaciones WSN debido a sus requisitos de energía reducida, amplio rango de cobertura y bajo costo en comparación con otras tecnologías de larga distancia (Bhoyar et al., 2019).

Estas tecnologías son ampliamente utilizadas en escenarios como la meteorología y el monitoreo ambiental, donde existen diferentes variables que pueden ser medidas para realizar un análisis de comportamiento y generar un sistema de alerta temprana (Talavera et al., 2017). La importancia del monitoreo de precipitaciones es de alto impacto debido a su influencia en una cantidad de factores que perjudican el normal comportamiento de algunas áreas. La pluviosidad de algunos fenómenos como lluvia, llovizna, nieve o granizo puede ayudar a generar alerta temprana a poblaciones afectadas por precipitaciones extremas que puedan originar desastres naturales (Noaa, 2012).

Así, este estudio efectúa una evaluación entre las tecnologías Zigbee, LoRaWAN y Sigfox para determinar la más indicada en términos de costo/desempeño para un sistema de monitoreo de precipitaciones en zonas urbanas. Para ejecutar la evaluación se caracteriza y desarrolla una red inalámbrica para cada una de las tecnologías a valorar. Se efectúan comparaciones entre los dispositivos seleccionados para realizar la caracterización tecnológica de cada una de las redes, sus parámetros son tomados para la ejecución de las simulaciones de los enlaces mediante el software libre Radio Mobile. Los resultados obtenidos se utilizan para seleccionar la tecnología inalámbrica más apropiada para la implementación del modelo de monitoreo de precipitaciones en la ciudad de Barranquilla.

4. Alcance

En este proyecto se realiza una evaluación entre los protocolos inalámbricos de comunicación Zigbee, LoRaWAN y Sigfox para determinar el más eficiente para la implementación de un sistema de monitoreo de precipitaciones en la ciudad de Barranquilla. La evaluación se basa en el comportamiento de las tecnologías en términos de comunicación, consumo energético y costo monetario. Para ejecutar la evaluación se diseña y caracteriza una red inalámbrica para cada una de las tecnologías a valorar. Las redes están compuestas por tres nodos sensores y una estación central de recolección de datos. Se realizan comparaciones entre los dispositivos seleccionados para cada una de las redes y sus características son tomadas para la ejecución de las simulaciones de los perfiles de enlace en el software libre Radio Mobile.

5. Fundamentación Teórica

Este proyecto de investigación se fundamenta en tres ejes temáticos: Monitoreo de precipitaciones, redes inalámbricas de sensores y tecnologías inalámbricas de comunicación para WSN. El estudio de los ejes temáticos permitirá definir los protocolos de comunicación más adecuados para realizar una evaluación tecnológica, con el fin de seleccionar la tecnología más indicada para desarrollar una red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones en la ciudad de Barranquilla.

5.1 Monitoreo de precipitaciones

Las precipitaciones son partes fundamentales de los recursos hídricos. Determinar la entrada de precipitaciones en una zona, como los ríos y embalses, es necesario para la gestión diaria de los recursos hídricos, de igual forma es de vital importancia cuantificarla con precisión en zonas urbanas. Los dispositivos de medición de las precipitaciones, como los pluviómetros, han sido una herramienta útil en los sistemas de vigilancia meteorológica durante mucho tiempo. Desde que el pluviómetro fue uno de los dispositivos que demostraron ser beneficiosos, el sistema pluviométrico se ha ido mejorando a medida que avanzaba la tecnología. (Mangundu, Mateus, Zodi, & Johson, 2018).

El volumen total de las precipitaciones que llegan al suelo durante un período determinado se expresa en función del nivel que alcanzarían sobre una proyección horizontal de la superficie terrestre. El objetivo principal de cualquier instrumento de medición de las precipitaciones es obtener muestras representativas de la precipitación en la zona a que se refiera la medición. En el caso de un pluviómetro, el agua recogida representará las precipitaciones que se hayan producido en la zona circundante (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

En el caso del monitoreo de precipitaciones, la vigilancia permite recoger toda la información relativa al evento y enviarla a las centrales de referencia, incluso en condiciones adversas. Los sistemas de monitoreo permiten medir la cantidad e intensidad de las lluvias, datos necesarios para apoyar a las autoridades en caso de emergencia, así como para diferentes aplicaciones en transporte, agricultura y otros sectores. Estos datos juegan un papel central dentro de múltiples contextos de riesgo, ya que son variables que impactan significativamente en el riesgo hidrogeológico e hídrico (CAE S.p.A, 2021).

Diferentes organizaciones e investigadores han tratado de encontrar formas más fáciles y económicas para establecer sistemas de monitoreo que controlen parámetros de lluvia. En el caso de las redes fijas, estos sistemas no siempre cubren por completo las zonas de recolección de datos, lo que hace necesario diseñar sistemas de bajo costo que permitan disponer de la información con facilidad (Albero, Sempere, Silvestre, & Dabbas, 2005).

Las redes de sensores inalámbricos son una de las soluciones que ofrecen monitoreo de alta calidad a bajo costo en términos de capital y mano de obra. En las últimas décadas se han desarrollado WSN medioambientales con el fin de recoger datos para utilizarlos en sistemas de control que ayudan a obtener y procesar información meteorológica como precipitaciones, temperatura y humedad del suelo en grandes zonas geográficas (Yuwono, Ruzardi, & Ismail, 2011).

5.2 Redes inalámbricas de sensores.

Una red inalámbrica de sensores (WSN) es una red que contiene sensores independientes que tienen por objetivo vigilar las condiciones físicas o ambientales. La WSN está formada por un conjunto de nodos sensores que se comunican entre sí e intercambian información y datos. Estos nodos obtienen información sobre el entorno como

la temperatura, la presión, la humedad o las precipitaciones. La información obtenida es enviada a una estación base, la cual remite los datos monitoreados a una red cableada y activa una alarma según su magnitud. Las aplicaciones típicas de las WSNs son el monitoreo meteorológico, el control físico de las condiciones ambientales, el rastreo en el transporte y el monitoreo de movimientos humanos y de animales en distintas zonas (Dulman, Chatterjea, & Havinga, 2005).

Hay cuatro componentes básicos en una red de sensores: (1) un conjunto de sensores distribuidos o localizados; (2) una red de interconexión; (3) un punto central de agrupación de la información; y (4) un conjunto de recursos informáticos en el punto central para gestionar la correlación de datos, las tendencias de los eventos, la consulta del estado y la extracción de datos (Sohraby, Minoli, & Znati, 2007).

En una WSN los nodos sensores se comunican entre sí y el flujo de información y datos se transmite hacia determinados nodos denominados estaciones base o sumideros. Un sumidero o estación base suele conectar la red de sensores a una red fija para distribuir los datos detectados para su posterior procesamiento. En general, las estaciones base tienen capacidades mejoradas con respecto a los nodos regulares, ya que deben llevar a cabo un procesamiento compuesto (Dulman et al., 2005).

En una WSN los nodos sensores se comunican entre sí y el flujo de información y datos se transmite hacia determinados nodos denominados estaciones base o sumideros. Un sumidero o estación base suele conectar la red de sensores a una red fija para distribuir los datos detectados para su posterior procesamiento. En general, las estaciones base tienen capacidades mejoradas con respecto a los nodos regulares, ya que deben llevar a cabo un procesamiento compuesto (Dulman et al., 2005).

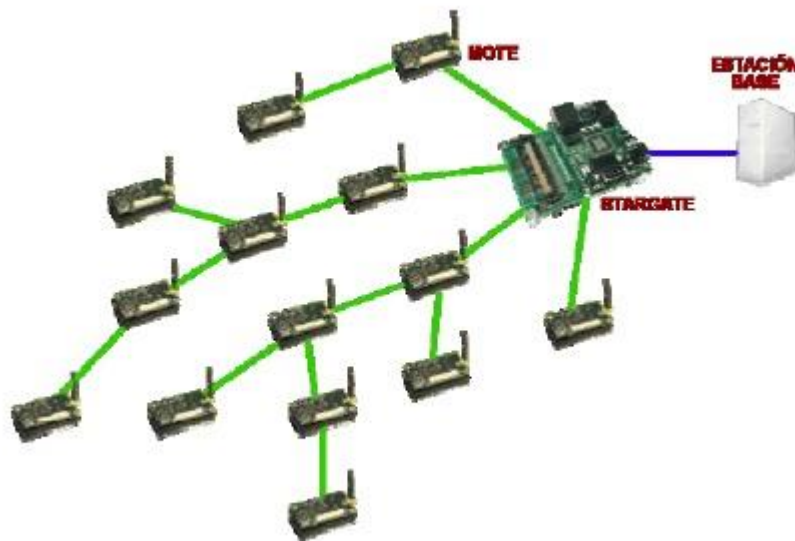


Figura 1. Red inalámbrica de sensores. Fuente: (Javier et al., 2009).

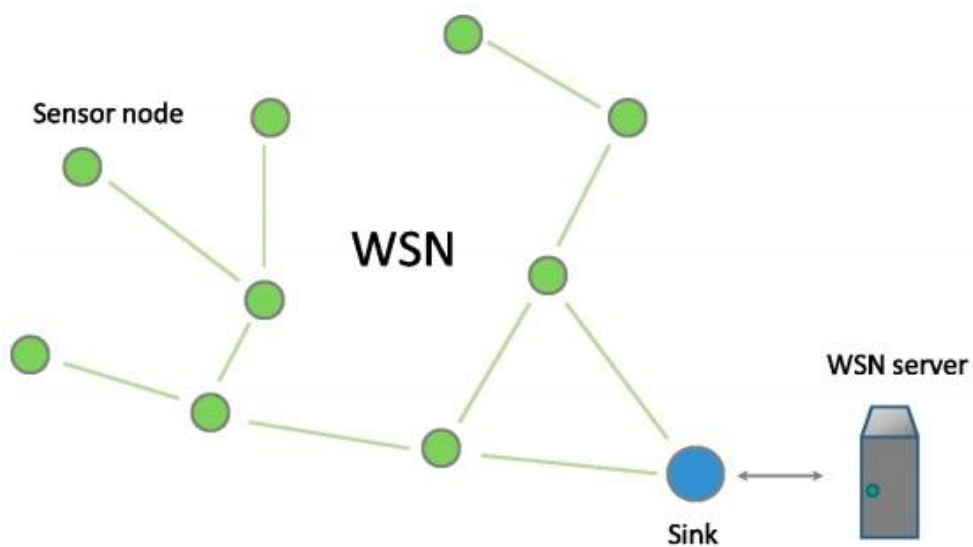


Figura 2. Arquitectura WSN. Fuente: (ITU-T, 2014).

Las WSNs son sistemas distribuidos espacialmente que constan de docenas, cientos o incluso miles de nodos sensores interconectados a través de un canal de conexión inalámbrico y que forman la red única. La figura 2 representa un ejemplo de una WSN. Aquí podemos ver una red que consta de nueve nodos sensores y un sumidero de red, que

también funciona como puerta de enlace (ITU-T, 2014). Un Gateway de campo es una de las posibilidades de sumidero de red para una arquitectura WSN. El Gateway comunica la red de nodos sensores con el servidor, de este modo, los nodos sensores envían sus datos al gateway y este envía la información recolectada al servidor para su posterior procesamiento.

El nodo sensor es el componente central de una red inalámbrica de sensores. Es un dispositivo muy pequeño que tiene la capacidad de percibir su entorno inmediato y mapear o almacenar la información (Dulman et al., 2005).

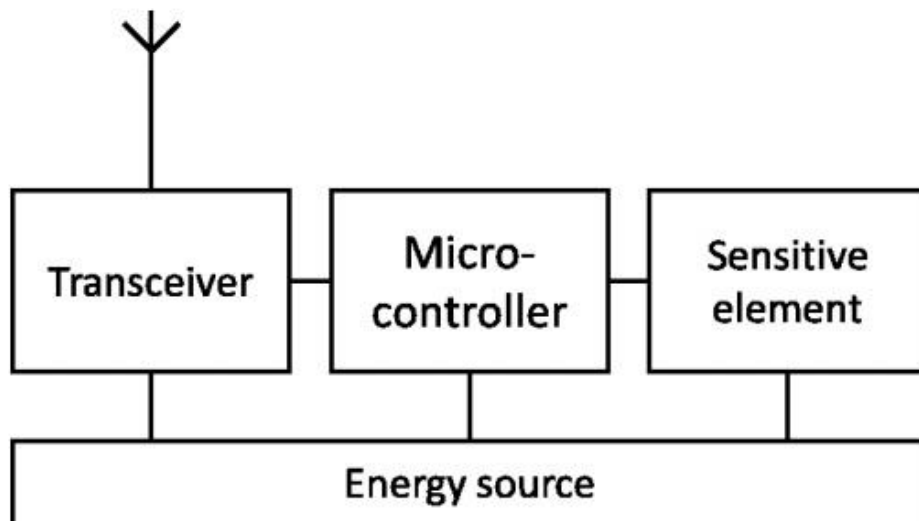


Figura 3. Estructura interna de un nodo sensor. Fuente: (ITU-T, 2014).

Cada nodo sensor es un dispositivo que tiene un transceptor, un microcontrolador y un elemento sensor (Figura 3). Por lo general, el nodo sensor es un dispositivo autónomo que mide algunas condiciones físicas y las convierte en datos digitales. De igual forma el nodo sensor también puede procesar y almacenar los datos medidos antes de su transmisión.

Dentro del nodo sensor un microcontrolador se encarga de la recogida de datos y la conexión con otros nodos sensores. El firmware del microcontrolador tiene un conjunto de algoritmos para controlar el transceptor y el elemento sensor que hacen posible el funcionamiento del nodo. De igual forma, el firmware del microcontrolador supervisa la batería del nodo sensor y cambia el modo de funcionamiento de todos sus componentes si se presenta algún inconveniente, todo con la finalidad de ampliar al máximo el tiempo de funcionamiento del nodo sensor como tal (ITU-T, 2014).

Las WSN utilizan el mismo medio de transmisión que las redes inalámbricas de área local (WLAN). Para que los nodos de una WLAN se comuniquen correctamente, existen protocolos de acceso estándar como el IEEE 802.11. Sin embargo, éste y otros protocolos no pueden aplicarse directamente a las redes inalámbricas de sensores (Dulman et al., 2005).

A diferencia de los dispositivos que participan en las redes de área local, los sensores de una WSN están equipados con una fuente de energía muy pequeña que se agota rápidamente. De ahí surge la necesidad de diseñar nuevos protocolos para WSNs que sean conscientes de la eficiencia energética. Lo cual evidencia la diferencia existente entre una WLAN tradicional y una WSN, ya que esta última tiene recursos limitados.

El protocolo de comunicación de una red inalámbrica de sensores debe cumplir con los requisitos de transmisión solicitado. Las WSN suelen tener una resolución espacial muy alta, lo que significa que cualquier arquitectura que se desarrolle debe ser capaz de manejar grandes cantidades de datos entrantes y salientes. De igual forma la sincronización de la transmisión es parte fundamental del desarrollo de una WSN, ya que varios paquetes de datos transmitidos al mismo tiempo pueden causar problemas a los receptores (Li & Kara, 2017).

5.3 Tecnologías inalámbricas de comunicación para WSN

La tecnología inalámbrica permite que uno o más dispositivos se comuniquen sin necesidad de una conexión física. Las aplicaciones de la tecnología inalámbrica y la tecnología por cable, se diferencian en que la primera utiliza un dispositivo de transmisión de frecuencia inalámbrica para transmitir datos, mientras que la segunda necesita un cable como medio de transmisión (Hua & Shunwuritu, 2021).

Generalmente las redes inalámbricas de sensores se diseñan utilizando las tecnologías existentes y los estándares disponibles. En una WSN se adquiere el estándar más adecuado basándose en los requisitos de una aplicación específica, seguido de los pasos de diseño necesarios para su implementación. Los requerimientos de la aplicación pueden variar entre la necesidad de gran ancho de banda, mayor duración de la batería de los dispositivos o una mejor cobertura. Por lo tanto, es una tarea esencial clasificar las tecnologías inalámbricas de acuerdo a sus principales características (Bhoyar et al., 2019).

En la actualidad podemos encontrar varios estándares de comunicación inalámbrica disponibles para las aplicaciones de WSN y cada uno de ellos tiene sus propias ventajas. Los protocolos más utilizados en WSN se pueden clasificar en estándares de muy corto alcance, estándares de corto alcance, protocolo Wi-Fi, estándares para redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) y estándares para la red celular.

Los estándares de muy corto alcance se han desarrollado para las aplicaciones de bajo costo y poca cobertura, un ejemplo de ellos son las tecnologías inalámbricas NFC y RFID. Estos estándares tienen un amplio campo de aplicación, son utilizados en asistencia sanitaria, entornos inteligentes, aplicaciones de intercambio y compartición de datos, aplicaciones de pago por móvil, emisión de billetes y fidelización, aplicaciones de

entretenimiento, aplicaciones de redes sociales y aplicaciones educativas (Bhoyar et al., 2019).

Los estándares de corto alcance más utilizados en implementaciones de WSN son los protocolos Bluetooth y ZigBee. Bluetooth, también conocido como estándar IEEE 802.15.1, se basa en un sistema de radio inalámbrico diseñado para que los dispositivos de corto alcance y económicos sustituyan a los cables de los periféricos informáticos, como ratones, teclados, joysticks e impresoras. El protocolo ZigBee sobre el estándar IEEE 802.15.4, define las especificaciones para WPAN de baja velocidad (LR-WPAN) para soportar dispositivos sencillos que consumen un mínimo de energía y suelen operar en el espacio operativo personal (POS) de 10m. ZigBee proporciona una red de malla autoorganizada, multisalto y fiable con una larga duración de la batería (Lee, Su, & Shen, 2007).

El protocolo wi-fi se utiliza generalmente en áreas públicas como hogares, oficinas e industrias, y sigue las especificaciones del estándar IEEE 802.11. Aunque el wi-fi consume mucha energía y requiere un alto coste de instalación inicial en comparación con otros transceptores de baja potencia, una vez que la infraestructura se construye, es fácil de usar y puede integrarse fácilmente con las tecnologías existentes y los dispositivos WSN. Utiliza una topología en estrella en la que el punto de acceso central está conectado a todos los demás nodos y todas las comunicaciones se enrutan únicamente a través de él (Bhoyar et al., 2019).

La tecnología de red de área amplia de baja potencia (LPWAN) está ganando cada vez más popularidad en las aplicaciones IoT y WSN debido a sus características de comunicación de bajo consumo, largo alcance y bajo costo. Proporciona una comunicación de largo alcance de hasta 10-40 km en zonas rurales y de 1-5 km en zonas urbanas. Muchas

tecnologías LPWAN han surgido en el ancho de banda de frecuencias, tanto con licencia como sin ella. Entre ellas, Sigfox, LoRa y NB-IoT son las principales tecnologías emergentes de hoy en día que son utilizadas por su infinidad de características (Mekki, Bajic, Chaxel, & Meyer, 2019).

Los estándares de comunicación celular son los planos del complejo sistema de radio y las redes que permiten la comunicación móvil y la conectividad global de los dispositivos. Constituyen la base de ecosistemas y mercados digitales totalmente nuevos, como las aplicaciones móviles, las redes inalámbricas de sensores (WSN) y el Internet de las cosas (IoT). Cada generación de estándares celulares apunta a un nuevo conjunto de avances para las redes y los servicios. La primera generación (1G) permitió una comunicación inalámbrica verdaderamente móvil. La 2G inauguró la era de los mensajes de texto. La 3G se definió por el acceso a Internet móvil, y la 4G proporcionó las altas velocidades de datos que han permitido la revolución de los teléfonos inteligentes y el ecosistema de aplicaciones que siguen transformando la sociedad hasta el día de hoy (IP Europe, 2019).

En resumen, las WSN operan con diferentes protocolos de comunicación inalámbrica utilizados en variedades de sus aplicaciones. Para el monitoreo climatológico, en especial la vigilancia de precipitaciones, los protocolos más utilizados son GPRS, Sigfox, LoRa, WiFi, ZigBee, Bluetooth y NarrowBand IoT (NB IoT). La tabla 3 compara estas tecnologías según el consumo de energía, el alcance, la seguridad y la velocidad de datos.

Tabla 1.*Características protocolos de comunicación para WSN.*

	GPRS	Bluetooth	WiFi	Zigbee	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT
Modulación	GMSK	GFSK	BPSK QPSK COFDM CCK MQAM	BPSK O-QPSK	CSS	BPSK	QPSK
Frecuencia	0,8 GHz 1,7 GHz 1,8 GHz	2.4GHz	2.4 GHz 5 GHz	868 MHz 915 MHz 2.4 GHz	915 MHz	915 MHz	Bandas de frecuencia LTE con licencia
Ancho de banda	200 kHz	1 MHz	22 MHz	300 kHz 600 kHz 2 MHz	125 kHz 250 kHz	100 Hz	200 kHz
Máxima velocidad de datos	114 kbps	1 Mbps	54 Mbps	250 kbps	300 kbps	100 bps 600 bps	200 kbps
Rango (Urbano)	5 km	10m	100m	100m	5 km	10 km	1 km
Corriente de transmisión (Max)	500mA	300mA	700mA	285mA	135mA	200mA	220mA

Fuente: (Lee et al., 2007)(Mekki et al., 2019)(Bhoyar et al., 2019).

Comparando todas las características, los protocolos Zigbee, LoRaWAN y Sigfox plantean una solución adecuada para el desarrollo de una WSN para el monitoreo de precipitaciones en zonas urbanas. Estas tecnologías permiten enlaces inalámbricos a grandes distancias con consumo de energía moderado. Narrowband-IoT (NB-IoT) es otra tecnología que cumple con los requisitos de transmisión y ahorro energético, sin embargo, su limitación de funcionamiento en bandas de frecuencia LTE con licencia, la hace menos accesible que las tres tecnologías anteriores.

5.3.1 Protocolo Zigbee

Zigbee es un estándar de comunicaciones inalámbricas bidireccionales de muy bajo costo y consumo desarrollado por ZigBee Alliance. Las soluciones que han adoptado el estándar ZigBee están incorporadas a la electrónica de consumo, la automatización de viviendas y edificios, los controles industriales, los periféricos de PC, las aplicaciones de sensores médicos y sistemas de monitoreo (Zand, Chatterjea, Ketema, & Havinga, 2012).

La arquitectura de ZigBee se compone de un conjunto de bloques llamados capas. Cada capa realiza un conjunto específico de servicios para la capa superior. Una entidad de datos proporciona un servicio de transmisión y una entidad de gestión proporciona todos los demás servicios. Cada entidad de servicio expone una interfaz a la capa superior a través de un punto de acceso al servicio (SAP) y cada SAP admite una serie de servicios para lograr la funcionalidad requerida (Zand et al., 2012).

El estándar IEEE 802.15.4-2003 define las dos capas inferiores: la capa física (PHY) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC). La ZigBee Alliance se basa en esta base proporcionando la capa de red (NWK) y el marco para la capa de aplicación. El marco de la capa de aplicación consiste en la subcapa de soporte de aplicaciones (APS) y los objetos de dispositivo ZigBee (ZDO). Los objetos de aplicación definidos por el fabricante utilizan el marco y comparten el APS y los servicios de seguridad con el ZDO.

IEEE 802.15.4-2003 tiene dos capas PHY que operan en dos rangos de frecuencia distintos: 868/915 MHz y 2,4 GHz. La capa PHY de menor frecuencia cubre tanto la banda europea de 868 MHz como la de 915 MHz, utilizada en países como Estados Unidos y Australia. La capa PHY de mayor frecuencia se utiliza prácticamente en todo el mundo.

La subcapa MAC del IEEE 802.15.4-2003 controla el acceso al canal de radio mediante un mecanismo CSMA-CA. Sus responsabilidades también pueden incluir la transmisión de tramas de baliza, la sincronización y la provisión de un mecanismo de transmisión fiable.

La capa de red de ZigBee (NWK) admite topologías de estrella, árbol y malla. En una topología en estrella, la red está controlada por un único dispositivo llamado coordinador ZigBee. El coordinador ZigBee es responsable de iniciar y mantener los dispositivos de la red. Todos los demás dispositivos, conocidos como dispositivos finales, se comunican directamente con el coordinador de ZigBee. En las topologías de malla y árbol, el coordinador de ZigBee es responsable de iniciar la red y de elegir ciertos parámetros clave de la misma, pero la red puede ampliarse mediante el uso de routers ZigBee.

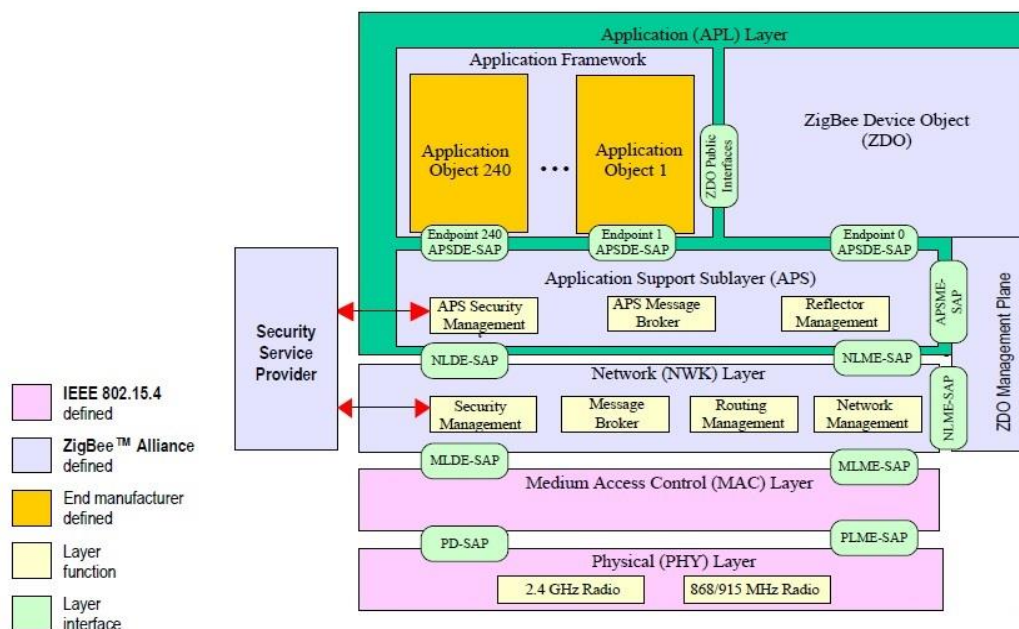


Figura 4. Esquema de la arquitectura de ZigBee. Fuente: (Zand et al., 2012).

5.3.2 Protocolo LoRaWAN

La especificación LoRaWAN es un protocolo de red de área amplia de baja potencia (LPWA) diseñado para conectar de forma inalámbrica "cosas" que funcionan con baterías a Internet en redes regionales, nacionales o mundiales. El protocolo incluye características que soportan una comunicación bidireccional segura, móvil y de bajo costo para el Internet de las Cosas (IoT), máquina a máquina (M2M), ciudad inteligente y aplicaciones industriales (LoRa Alliance, 2015).

El protocolo LoRaWAN está optimizado para un bajo consumo de energía y está diseñado para escalar desde una única instalación de puerta de enlace hasta grandes redes globales con miles de millones de dispositivos. Entre las características innovadoras de la especificación LoRaWAN se encuentran el soporte para el funcionamiento redundante, la geolocalización, el bajo costo y el bajo consumo: Los dispositivos pueden incluso funcionar con tecnologías de captación de energía, lo que permite la movilidad y aporta una verdadera facilidad de uso a la Internet de los objetos.

LoRa es la capa física o la modulación inalámbrica utilizada para crear el enlace de comunicación de largo alcance. Muchos sistemas inalámbricos heredados utilizan la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) como capa física porque es una modulación muy eficiente para conseguir una baja potencia.

LoRa se basa en la modulación de espectro ensanchado chirp, que mantiene las mismas características de baja potencia que la modulación FSK, pero aumenta considerablemente el alcance de la comunicación. El espectro ensanchado chirp se ha utilizado en las comunicaciones militares y espaciales durante décadas debido a las largas distancias de comunicación que pueden alcanzarse y su robustez frente a las interferencias, pero LoRa es la primera implementación de bajo costo para uso comercial.

LoRaWAN define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red, mientras que la capa física de LoRa permite el enlace de comunicación de largo alcance. El protocolo y la arquitectura de la red son los que más influyen a la hora de determinar la duración de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad y la variedad de aplicaciones a las que sirve la red.

La arquitectura de la red LoRaWAN se despliega en una topología de estrella en la que las pasarelas retransmiten mensajes entre los dispositivos finales y un servidor de red central. Las pasarelas están conectadas al servidor de red mediante conexiones IP estándar y actúan como un puente transparente, convirtiendo simplemente los paquetes de RF en paquetes IP y viceversa. La comunicación inalámbrica aprovecha las características de largo alcance de la capa física de LoRa, permitiendo un enlace de un solo salto entre el dispositivo final y una o varias pasarelas.

Además de los saltos de frecuencia, todos los paquetes de comunicación entre los dispositivos finales y las pasarelas incluyen un ajuste variable de "velocidad de datos" (DR). La selección de la DR permite un equilibrio dinámico entre el alcance de la comunicación y la duración del mensaje. Además, gracias a la tecnología de espectro ensanchado, las comunicaciones con diferentes DR no interfieren entre sí y crean un conjunto de canales virtuales "de código" que aumentan la capacidad de la pasarela. Para maximizar tanto la duración de la batería de los dispositivos finales como la capacidad global de la red, el servidor de la red LoRaWAN gestiona el ajuste de la DR y la potencia de salida de RF para cada dispositivo final de forma individual mediante un esquema de velocidad de datos adaptativa (ADR).

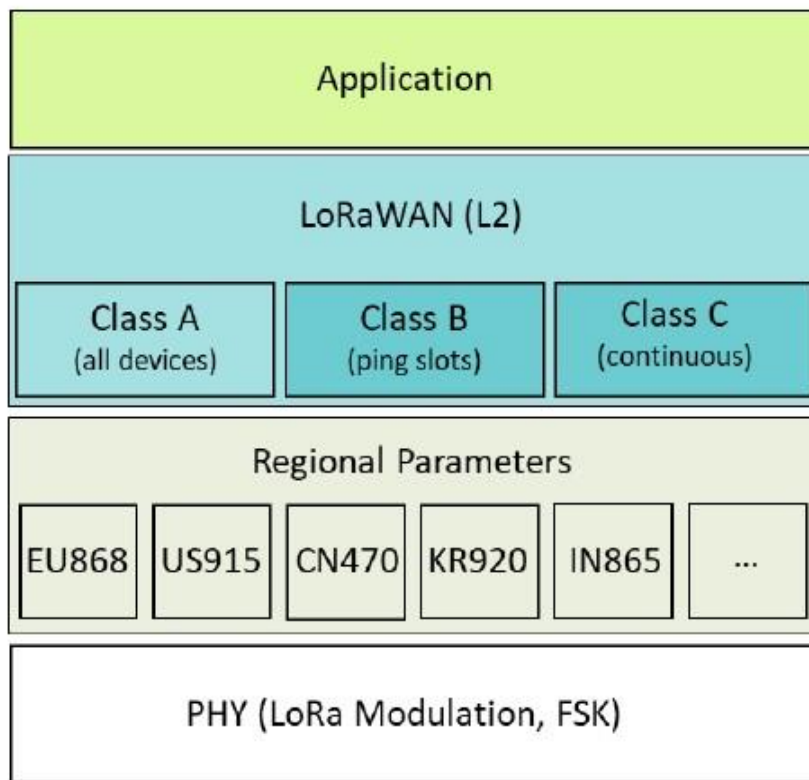


Figura 5. Clases LoRaWAN. Fuente: (Alliance, 2020).

LoRaWAN cuenta con tres clases diferentes de dispositivos de punto final para responder a las distintas necesidades reflejadas en la amplia gama de aplicaciones: Clase A - Dispositivos finales bidireccionales de bajo consumo, Clase B - Dispositivos finales bidireccionales con latencia de enlace descendente determinista y Clase C - Latencia más baja, dispositivos finales bidireccionales.

La clase A es la clase por defecto que deben soportar todos los dispositivos finales de LoRaWAN, la comunicación de clase A siempre es iniciada por el dispositivo final y es totalmente asíncrona. Cada transmisión de enlace ascendente puede enviarse en cualquier momento y va seguida de dos breves ventanas de enlace descendente, lo que da la oportunidad de una comunicación bidireccional, o de comandos de control de la red si es necesario.

Los dispositivos de clase B se sincronizan con la red mediante balizas periódicas y abren "franjas de ping" en el enlace descendente a horas programadas. Esto proporciona a la red la capacidad de enviar comunicaciones de enlace descendente con una latencia determinista, pero a costo de un cierto consumo de energía adicional en el dispositivo final. La latencia es programable hasta 128 segundos para adaptarse a diferentes aplicaciones y el consumo de energía adicional es lo suficientemente bajo como para seguir siendo válido para aplicaciones alimentadas por batería.

La clase C reduce aún más la latencia en el enlace descendente al mantener abierto el receptor del dispositivo final en todo momento en que el dispositivo no esté transmitiendo (semidúplex). De este modo, el servidor de la red puede iniciar una transmisión de enlace descendente en cualquier momento suponiendo que el receptor del dispositivo final está abierto, por lo que no hay latencia.

Con LoRaWAN cada mensaje transmitido por un dispositivo final es recibido por todas las estaciones base del rango. Sin embargo, para conseguir esta característica se necesitan múltiples estaciones base en la zona, lo que puede aumentar el costo de despliegue de la red. Las recepciones duplicadas resultantes se filtran en el sistema backend (servidor de red) que también tiene la inteligencia necesaria para comprobar la seguridad, enviar notificación de recibo al dispositivo final y enviar el mensaje al servidor de aplicaciones correspondiente. Además, LoRaWAN aprovecha las múltiples recepciones del mismo mensaje por parte de diferentes estaciones base para localizar los dispositivos finales (Mekki et al., 2019).

5.3.3 Protocolo Sigfox

Sigfox es un operador de redes LPWAN que ofrece una solución de conectividad IoT de extremo a extremo basada en sus tecnologías patentadas (Mekki et al., 2019). Las aplicaciones que pueden hacer uso de esta tecnología son las que piden una pequeña transferencia de datos, siendo su base representada por una tecnología de tipo UNB (Ultra Narrow Band) (Lavric, Petrariu, & Popa, 2019).

SigFox utiliza una nueva estrategia a la hora de abordar el concepto de IoT, convirtiéndose en un modelo de negocio característico de un operador de red en los últimos años. Consiste en una infraestructura móvil a través de antenas y estaciones independientes de las redes móviles actuales. Aunque también se asocia con operadores de telefonía móvil pero su finalidad no es aumentar el ancho de banda ni la capacidad de servicios como los operados, sino la de proveer conexión a cualquier dispositivo, objeto o máquina para conectarse a Internet (Bernal, 2020).

La principal ventaja de esta tecnología es su resistencia a las interferencias y colisiones, que es posible gracias a la aplicación de un mecanismo de diversidad tanto en tiempo como en frecuencia. Este mecanismo supone la introducción de redundancia a nivel de comunicación, pero también tiene una desventaja importante por el aumento del grado de ocupación del canal e implícitamente del número de eventuales colisiones (Lavric et al., 2019).

A nivel físico, el protocolo SigFox utiliza la modulación D-SSK para permitir la modulación del enlace descendente y la modulación GFSK para los paquetes. La técnica de modulación utiliza el enlace descendente para enviar un bit en un ancho de banda de 1 Hz. Por ello, la tecnología se adapta a las aplicaciones que envían datos a una velocidad de

transferencia reducida. También se cuenta con el mecanismo de control de potencia y la asignación pseudoaleatoria de las frecuencias de comunicación.

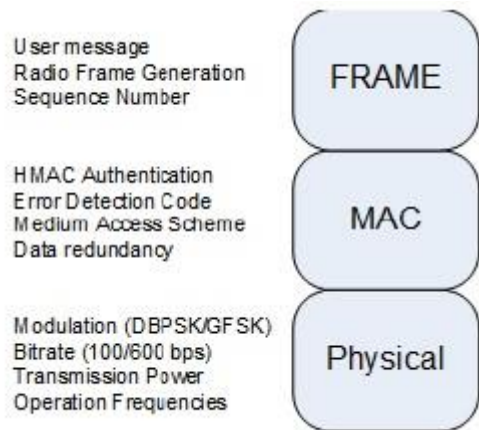


Figura 6. Arquitectura de protocolos Sigfox. Fuente: (Lavric et al., 2019).

Sigfox despliega sus propias estaciones base equipadas con radios cognitivas definidas por software y las conecta a los servidores de back-end utilizando una red basada en IP. Los dispositivos finales se conectan a estas estaciones base utilizando la modulación binaria por desplazamiento de fase (BPSK) en una portadora de banda ISM ultraestrecha (100 Hz) sub-GHz. Sigfox utiliza bandas ISM sin licencia, por ejemplo, 868 MHz en Europa, 915 MHz en Norteamérica y 433 MHz en Asia.

Al emplear la banda ultraestrecha, Sigfox utiliza el ancho de banda de la frecuencia de manera eficiente y experimenta niveles de ruido muy bajos, lo que lleva a un consumo de energía muy bajo, una alta sensibilidad del receptor y un diseño de antena de bajo costo a un rendimiento máximo de sólo 100 bps.

Inicialmente, Sigfox sólo soportaba la comunicación de enlace ascendente, pero posteriormente evolucionó a la tecnología bidireccional con una importante asimetría de enlace. La comunicación de enlace descendente, es decir, los datos de las estaciones base a

los dispositivos finales, sólo puede producirse tras una comunicación de enlace ascendente. El número de mensajes por el enlace ascendente está limitado a 140 mensajes por día.

La longitud máxima de la carga útil de cada mensaje de enlace ascendente es de 12 bytes. Sin embargo, el número de mensajes en el enlace descendente está limitado a cuatro mensajes por día, lo que significa que no se admite el acuse de recibo de cada mensaje de enlace ascendente. La longitud máxima de la carga útil de cada mensaje de enlace descendente es de ocho bytes. Sin el apoyo adecuado de los acuses de recibo, la fiabilidad de la comunicación de enlace ascendente se garantiza mediante la diversidad de tiempo y frecuencia, así como la duplicación de la transmisión.

Cada mensaje del dispositivo final se transmite varias veces (tres por defecto) por diferentes canales de frecuencia. Para ello, en Europa, por ejemplo, la banda entre 868,180 MHz y 868,220 MHz se divide en 400 canales ortogonales de 100 Hz (de los cuales 40 canales están reservados y no se utilizan). Como las estaciones base pueden recibir mensajes simultáneamente en todos los canales, el dispositivo final puede elegir aleatoriamente una frecuencia para transmitir sus mensajes. Esto simplifica el diseño del dispositivo final y reduce su costo.

6. Estado Del Arte

La revisión del estado de la literatura de esta investigación se realiza con el propósito de describir diseños e implementaciones de redes inalámbricas de sensores para el monitoreo de precipitaciones, en este caso se encontraron diferentes trabajos basados en sistemas de alerta temprana, monitoreo de precipitaciones, entre otros. De igual forma se encontró dentro de la literatura, redes de monitoreo anteriormente implementadas en la ciudad de Barranquilla y proyectos de redes de sensores inalámbricos que han sido evaluadas a través del software libre Radio Mobile.

En esta revisión se consultaron diferentes bases de datos, específicamente: Science Direct, Scopus, IEEE, ResearchGate, Google Scholar, entre otras. La Tabla 2 muestra las cadenas de búsqueda de inclusión y exclusión de términos con los mejores resultados para los tres ejes temáticos incluidos en el estado del arte.

Tabla 2.

Cadenas de búsqueda de inclusión y exclusión de términos.

Cadena de búsqueda	Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Rainfall Monitoring AND Wireless technologies AND Urban Flood	Artículos de investigación, papers de conferencias, reportes de entidades gubernamentales, artículos en inglés y español.	Resultados que no están relacionados con los temas, artículos de idiomas diferentes a los idiomas establecidos.
Warning systems AND Wireless sensor network AND Barranquilla		
Radio Link AND Radio Mobile AND Wireless Communication		

Fuente: propia del autor

Obtenidos los resultados de la búsqueda, la información fue categorizada en los siguientes subtemas: Redes inalámbricas de monitoreo de precipitaciones, Sistemas de alerta temprana en Barranquilla y Diseño de redes y simulación en el software Radio Mobile.

6.1 Redes inalámbricas de monitoreo de precipitaciones

Los pluviómetros autónomos y conectados se utilizan en muchas ciudades para el monitoreo de precipitaciones (Kama, Diallo, & Drame, 2018). Anteriormente, la tecnología GPRS era la más utilizada para la implementación de estas redes. En (Garcia, Retamar, & Javier, 2016) se desplegó un sistema de monitoreo de inundaciones urbanas en tiempo real utilizando la red GPRS en el Bulevar España, Manila, Filipinas. Las estaciones del sistema estaban compuestas por un sensor de presión en tierra y un pluviómetro conectado a un registrador de datos. Los datos de las estaciones eran enviados utilizando la red GPRS hacia un servidor TCP. La información obtenida era procesada para proporcionar información visual y actualizaciones de las inundaciones en tiempo real a través de servicios móviles y de la web.

Los costos de operación, consumo energético y desarrollo de protocolos IoT han dado lugar a nuevas tecnologías inalámbricas para el monitoreo de precipitaciones en tiempo real. En (Santos, Firmino, Mattos, & Medeiros, 2020) se desarrolla una aplicación de lluvia basada en una arquitectura híbrida para proporcionar comunicación entre un pluviómetro digital y un servidor de datos a través de tecnologías de comunicación inalámbricas en Petrópolis, Río de Janeiro, Brasil . La arquitectura híbrida propuesta se basa en la comunicación de corto y largo alcance que compara el rendimiento de las tecnologías Wi-Fi y LoRa. Las tecnologías inalámbricas son evaluadas en términos de pérdida de paquetes, rendimiento y retraso en la llegada de los paquetes para el desarrollo del prototipo.

Para desplegar la aplicación de monitoreo remoto de lluvia desarrollaron un prototipo de Wi-Fi y un prototipo de LoRa compuestos por un receptor conectado a un servidor de datos y un transmisor conectado a un pluviómetro digital. Para la evaluación del

rendimiento de las tecnologías se llevaron a cabo experimentos en diferentes escenarios de medición en tiempo real. Los resultados mostraron que Wi-Fi proporciona un mayor ancho de banda en distancias cortas, mientras que LoRa proporciona una comunicación resistente en distancias largas.

Los sistemas de alertas tempranas es una de las aplicaciones más utilizadas en el monitoreo de precipitaciones. En (Vitadhani, Alief, Haryanto, Harwahu, & Fitri Sari, 2020) se llevó a cabo un estudio a través de simulaciones para explorar el uso de la tecnología LoRaWAN para el sistema de control de alerta temprana de inundaciones en el río Ciliwung, Yakarta, Indonesia. El río Ciliwung contaba con un sistema de telemetría anterior que presentaba limitaciones presupuestales y de seguridad, por lo cual se necesitaba mejorar el sistema para que se permitiera realizar, aumentar y optimizar los instrumentos y la infraestructura utilizada anteriormente.

En (Vitadhani et al., 2020) se discute específicamente el uso de la tecnología Lora como base de comunicación desde los puntos de medición hasta los Gateways LoRaWAN colocados en puntos óptimos. Para determinar la ubicación de los Gateways, midieron las distancias y las alturas exactas de los puntos de medición del sistema de telemetría existente, dividiendo en dos áreas los puntos de recolección de datos. Los resultados de las simulaciones realizadas en el software Network Simulator 3 (NS3) muestran que la primera área puede ser cubierta con sólo un Gateway a 30 metros de altura y la segunda área con un Gateway a una altura de 108 metros o usando 2 Gateways a una altura de 30 metros cada uno. Al final se concluyó que la tecnología LoRaWAN puede utilizarse para apoyar la telemetría del nivel del agua para formar un sistema de alerta temprana de inundaciones fluviales.

6.2 Sistemas de alerta temprana en Barranquilla

Desde hace varios años la ciudad de Barranquilla viene presentando una problemática en la gestión de las aguas pluviales en su área urbana. La falta de un sistema de drenaje de aguas pluviales en la totalidad de la ciudad y las altas pendientes de las calles y las zonas impermeables, producen escorrentías que fluyen por las calles con caudales superiores a 100 m³/s durante los eventos de lluvia (Ávila, 2012). En (Ávila, Ávila, & Sisa, 2017) se desarrolla un modelo de alerta temprana para la gestión de las crecidas repentinas en la ciudad de Barranquilla, basado en datos de precipitaciones en tiempo real, y la integración de un modelo de precipitación-escorrentía en el PCSWM con los criterios de toma de decisiones sobre peligros asociados a la profundidad y la velocidad del agua.

Para el desarrollo del sistema se instalaron doce medidores de lluvia en la ciudad cubriendo alrededor de 150 Km². El modelo combina el procesamiento de datos de precipitaciones en tiempo real (con un intervalo de 1 minuto), un modelo de precipitación-escorrentía en el PCSWMM y una estimación del nivel de peligro para cada intersección en calles susceptibles de una inundación repentina. Al final, los resultados de las calibraciones y las validaciones de los datos de precipitaciones y flujo medidos permitieron anticipar el caudal y el nivel de peligro de 5 a 40 minutos de antelación. Ese tiempo puede permitir a las personas tomar decisiones rápidas con respecto a su movilidad sobre la ciudad y reducir los accidentes causados por las inundaciones repentinas.

En otra investigación se describe un sistema de alerta temprana de bajo costo para detectar en tiempo real el nivel de peligro de un arroyo en la ciudad de Barranquilla. Para el despliegue del sistema en (Acosta-Coll et al., 2018) desarrollaron un modelo hidráulico e hidrológico capaz de calcular la velocidad, el caudal y el nivel del agua y su variación en el tiempo. El modelo despliega su información en secciones transversales de un arroyo en una

cuenca no calibrada utilizando únicamente pluviómetros y datos de estudios topográficos. Posteriormente, se envía la alerta a una plataforma web mediante una red de sensores inalámbricos para advertir a la comunidad en tiempo real de la peligrosidad del evento.

Las redes de sensores inalámbricos también han sido utilizadas para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla. En (Cama-Pinto et al., 2016) se muestra el diseño de una arquitectura de red de sensores inalámbricos para monitorear en tiempo real parámetros atmosféricos que influyen en la detección del nivel de peligrosidad de inundaciones repentinas.

Para el despliegue de la red se caracteriza una sección del recorrido de un arroyo específico de la ciudad para identificar los puntos donde se reciben mayores afluentes y establecer los nodos que vigilarán las condiciones ambientales que instauran el nivel de alerta. Para la captura y transmisión de los datos se hace uso de la plataforma Waspote de Libelium y la tecnología Zigbee mediante los módulos de radio XBee-PRO ZB (S2). La información obtenida por los nodos es alojada en un servidor para ser finalmente exhibida en una aplicación web móvil desarrollada para mostrar a la población el nivel de peligrosidad del arroyo en diferentes puntos de su trayectoria.

6.3 Diseño de redes y simulación en el software Radio Mobile.

Bajo la implementación del modelo Longley-Rice, el software Radio Mobile tiene múltiples utilidades de apoyo para el diseño y simulación de los enlaces y las redes de telecomunicaciones. Los parámetros de simulación permiten reflejar en forma real los equipos pensados a utilizar en la implementación física (García Garrancho, 2006).

Diferentes trabajos utilizan el software Radio Mobile para simular radioenlaces y poder proporcionar importante información de diseño. En este caso, (Trandafir, Fratu, & Halunga, 2010) presenta el análisis de salida de la simulación de una red pública Wi-Fi

utilizando la aplicación Radio Mobile. La red consiste en puntos de acceso instalados en el techo de los trenes y antenas fijas montadas en mástiles del lado de la vía férrea de Bucarest-Brasov, Rumania. Los resultados de las simulaciones exponen la distribución y disponibilidad de la señal de radio en términos de cobertura de área y enlaces punto a punto entre las unidades de radio establecidas.

El software radio mobile también es utilizado en (Balmaceda, Aubert, & Arias, 2018) con el fin de ampliar la zona de cobertura y mejorar la capacidad de la red WiMAX del prestador de servicios de internet Yota en Nicaragua. Para ello, se realizaron simulaciones de radioenlaces y se implementaron en tres sitios representativos de la red WiMAX para realizar una campaña de mediciones y monitoreo de los radioenlaces establecidos. El análisis comparativo de las predicciones con los resultados de las mediciones y el monitoreo en los sitios de la red WiMAX, demuestran una mejoría del 50% de la capacidad de la red con la implementación y supervisión de los enlaces radioelétricos de bajo costo diseñados. Del resultado de las simulaciones también se pudo concluir que el rendimiento y la cobertura de la red WiMAX se puede mejorar utilizando técnicas de antenas múltiples y esquemas de modulación y codificación de orden superior.

7. Metodología

El presente trabajo de grado se fundamenta en tres fases de actuación: caracterización, diseño y desarrollo, y finalmente, análisis y evaluación de resultados.

El primer escenario implica la recolección documental de diferentes fuentes bibliográficas, con el fin de establecer el estado del arte y la fundamentación teórica del proyecto. En el segundo escenario se despliega el diseño y desarrollo de la red de monitoreo de precipitaciones. En primera instancia se realiza la caracterización de la red, seguido de la selección de dispositivos para el desarrollo de la misma. Finalmente, se verifica la estimación de los perfiles de enlace mediante el software gratuito Radio Mobile, teniendo en cuenta los parámetros y caracterización de las redes de comunicación inalámbricas establecidas. En la tercera fase se efectúa el análisis y evaluación de resultados en términos de comunicación, consumo energético y costo monetario. Al final se determina la red de comunicación inalámbrica más adecuada para el monitoreo de precipitaciones en la zona urbana estudiada.

El enfoque investigativo utilizado para el desarrollo del proyecto es de tipo aplicado, con el cual básicamente se busca establecer el protocolo de comunicación más adecuado para el desarrollo de una red de monitoreo de precipitaciones en la ciudad de Barranquilla. Se realiza una evaluación de tres protocolos de comunicación inalámbrica de baja potencia, Zigbee, LoRaWAN y Sigfox, bajo los términos estipulados de comunicación, consumo energético y costo monetario para la implementación del sistema de monitoreo.

A continuación, se presenta una matriz metodológica donde se aprecia la correspondencia entre las fases, objetivos, actividades y resultados que se quieren obtener con el desarrollo de la presente propuesta.

Tabla 3.*Matriz metodológica.*

Fase	Objetivo Específico	Actividades	Resultados
Caracterización	Caracterizar protocolos de comunicaciones inalámbricas para su aplicación en un sistema de monitoreo de precipitaciones ubicado en una zona urbana de la ciudad Barranquilla.	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión preliminar de la literatura para la contextualización del ámbito de la investigación. • Construcción de cadenas de búsquedas y su respectiva aplicación en bases de datos científicas especializadas. • Estudio de los protocolos Wireless wpan y lpwan. • Identificar las características de los sistemas de monitoreo para precipitaciones urbanas. • Identificar las características de los protocolos de comunicaciones inalámbricas para su uso en sistemas de monitoreo de precipitaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redacción y postulación de un artículo científico sobre el estado del arte de la investigación. • Redacción de los primeros capítulos de la monografía, en relación con la fundamentación teórica, conceptual y referencial que sustentan el proyecto.
Diseño y desarrollo	Desarrollar una red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones de acuerdo a las características de cada protocolo de comunicación establecido.	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de puntos de medición (altura, posición, tipo de terreno, distancias) • Selección de los equipos para el establecimiento de la red. • Diseño de la arquitectura de hardware y comunicaciones del sistema de captación de datos. • Simulación de los perfiles de enlace de la red mediante el software Radio Mobile. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redacción de capítulos de la monografía en relación con la descripción conceptual de la solución propuesta y las tecnologías que permiten la implementación funcional de dicha solución. • Divulgación de avances en eventos científicos.

Análisis y evaluación de resultados	Evaluar el rendimiento de los protocolos inalámbricos seleccionados teniendo en cuenta el desempeño de la red en términos de comunicación, consumo energético y costos monetarios.	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de los resultados de simulación en términos de comunicación. • Selección del protocolo de comunicación inalámbrico con mayor eficiencia energética. • Selección del protocolo de comunicación inalámbrico con menor costo económico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redacción y postulación de un artículo científico de resultados • Entrega monografía
--	--	---	---

Fuente: propia del autor

7.1 Diseño y desarrollo de una red inalámbrica para monitoreo de precipitaciones

En esta sección se presenta el diseño y desarrollo de una red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones para determinar el protocolo con mejores prestaciones de comunicación en zonas urbanas. En primera instancia se determina el área de cobertura, la ubicación de los nodos y la distancia existente entre la estación central y los nodos sensores. Con la caracterización de la red se prosigue a seleccionar los dispositivos más adecuados para cada protocolo. Se busca que los equipos proporcionen la mejor conectividad inalámbrica en zonas urbanas, consumo energético moderado y costos monetarios considerables.

Finalmente, se diseña una WSN para cada tecnología y se realiza la evaluación de sus perfiles de enlace mediante el software gratuito Radio Mobile. Esta herramienta permite simular enlaces de radio que operan dentro del rango de 20 MHz a 20 GHz y modela planos de relieve del lugar de estudio, obteniendo valores bastante similares a los adquiridos en las implementaciones físicas (Caicedo Ortiz, 2015). Este software permite emular las

características del sistema de comunicación inalámbrico, incluyendo los parámetros de cada equipo.

Las redes de sensores inalámbricos son un conjunto de sensores autónomos distribuidos espacialmente en una región concreta para observar algún fenómeno y recolectar datos de interés (Javier et al., 2009). Una WSN está compuesta por diferentes nodos sensores que adquieren datos y un nodo maestro que envía la información recolectada a una estación base para su posterior procesamiento (Koucheryavy & Salim, 2009).

Para el diseño de la WSN con Zigbee, LoRaWAN, y Sigfox, se toma como base la arquitectura del sistema de alerta temprana desarrollado por la Universidad de la Costa (Acosta-Coll et al., 2018). El SAT contiene tres nodos de captura de datos para monitorear la peligrosa inundación repentina llamada "La Brigada" en la ciudad de Barranquilla.

Para el desarrollo de este proyecto se eligen los mismos puntos de ubicación de los nodos sensores utilizados por el sistema de alerta temprana. Se adiciona un cuarto punto de análisis correspondiente a la unidad central de la red conformada por el gateway de cada uno de los protocolos a evaluar. La ubicación de cada uno de los puntos de análisis junto con la distancia existente entre los nodos sensores y la estación base se encuentran registrados en la Tabla 4. En la Figura 7 se ilustra la distribución establecida para el desarrollo de la red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones.

Tabla 4.

Ubicación puntos de análisis red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones.

Punto	Ubicación	Distancia entre nodo a gateway
Gateway	10°59'42.69"N, 74°47'20.25"W	N/A
Nodo 1	10°59'1.57"N, 74°48'6.34"W	1,89 Km
Nodo 2	10°59'30.90"N, 74°47'48.26"W	0,92 Km
Nodo 3	10°59'35.81"N, 74°47'35.18"W	0,50 Km

Fuente:(Acosta-Coll et al., 2018).

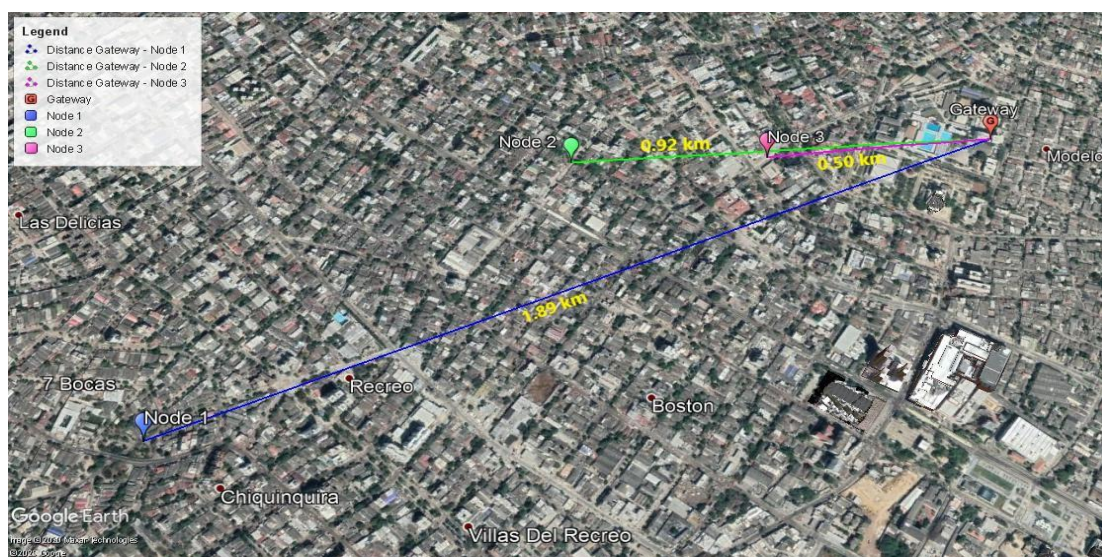


Figura 7. Distribución red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones.

7.2 Arquitectura y parámetros de red

La red de monitoreo de precipitaciones está diseñada para trabajar en una topología estrella, compuesta por tres nodos sensores encargados de la recolección de datos y una estación base que recibe toda la información para su posterior procesamiento. La figura 8 representa la distribución de los nodos sensores y la estación base de la red de monitoreo de precipitaciones.

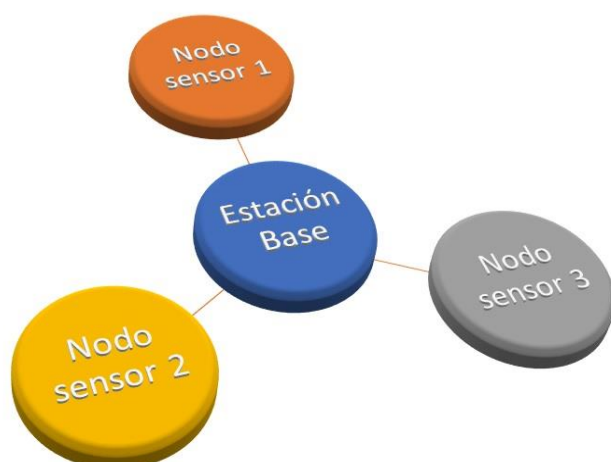


Figura 8. Distribución nodos sensores y estación base. Fuente: propia del autor

La estación base y cada nodo sensor están conformados por varios componentes de hardware. Los nodos sensores están conformados por cuatro unidades principales: potencia, microcontrolador, sensor y transmisión. La unidad de potencia está compuesta por un panel solar, una batería recargable y un regulador de carga. El microcontrolador escogido por su accesibilidad en general es el Arduino Uno. Para la unidad sensoria solo es necesario la conexión de un pluviómetro. La unidad de transmisión la conforman los módulos correspondientes a cada uno de los protocolos inalámbricos a evaluar. Las figuras 9, 10 y 11 ilustran los componentes de hardware utilizados en los nodos sensores de la red de monitoreo de precipitaciones.

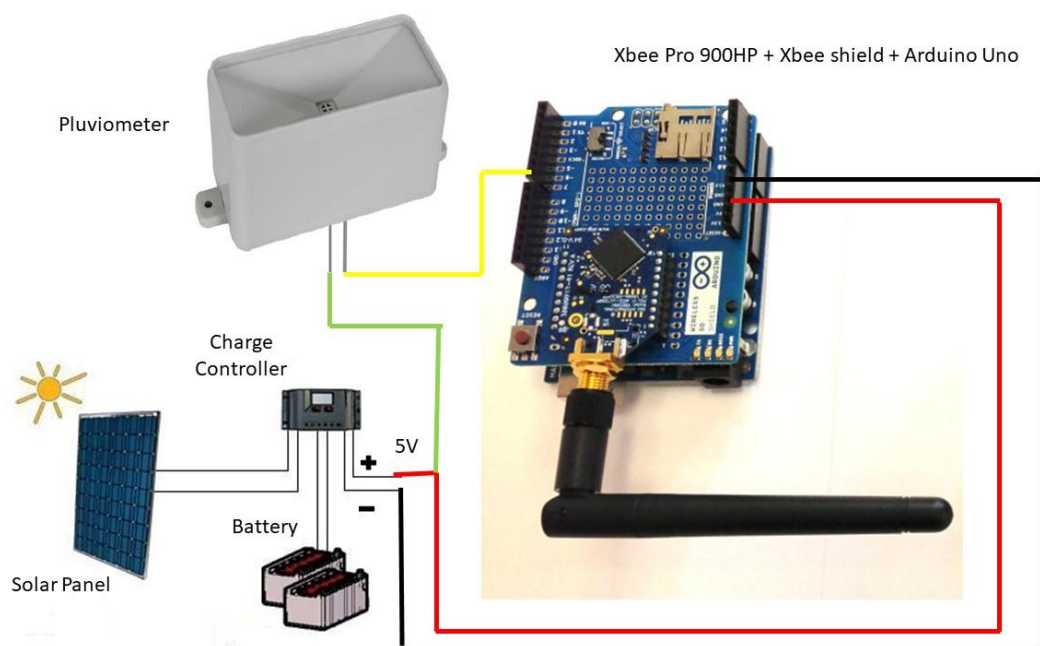


Figura 9. Componentes de hardware nodos sensores red Zigbee. Fuente: propia del autor

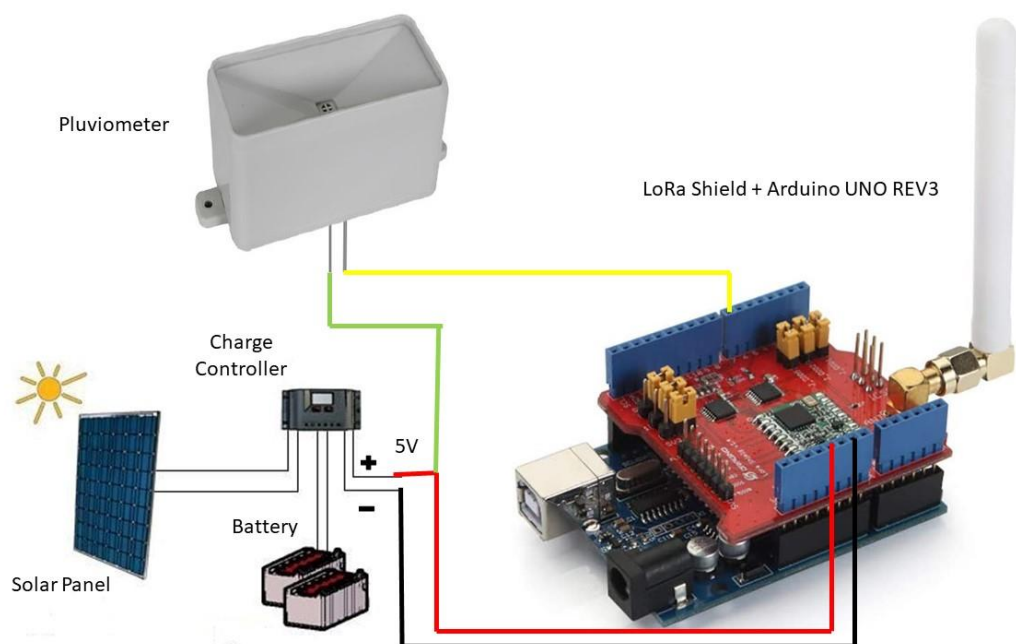


Figura 10. Componentes de hardware nodos sensores red LoRaWAN. Fuente: propia del autor

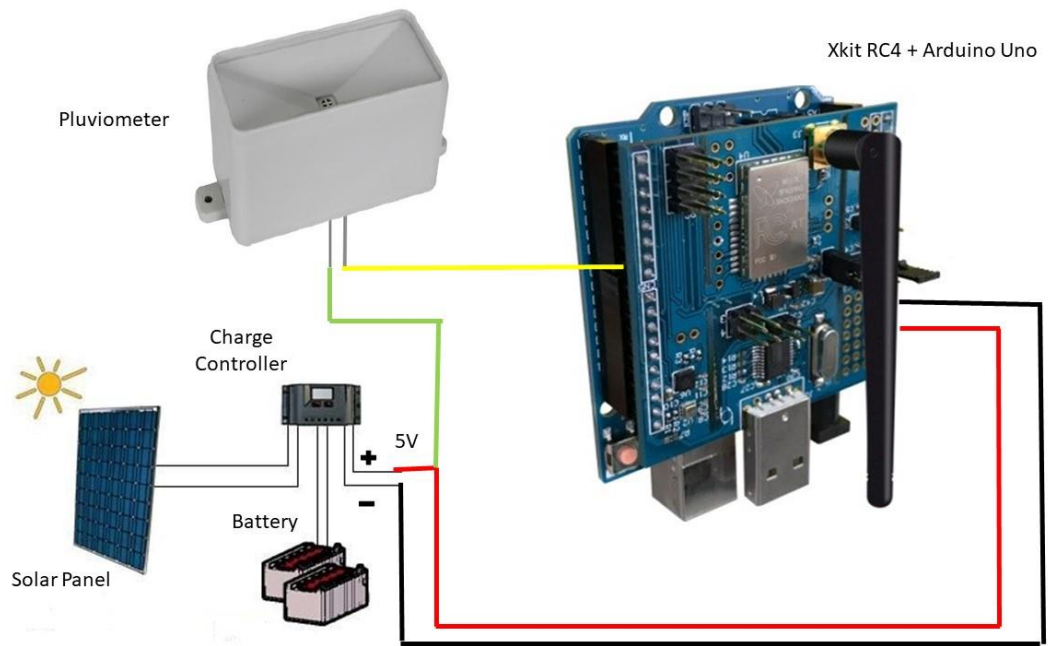


Figura 11. Componentes de hardware nodos sensores red Sigfox. Fuente: propia del autor

Los módulos integrados XBee-PRO 900HP, seleccionados para el protocolo Zigbee, son fáciles de usar, comparten una huella de hardware común y proporcionan la mejor conectividad inalámbrica a dispositivos de su clase (East, 2008). El Dragino LoRa Shield v1.2, módulo seleccionado para el protocolo LoRAWAN, permite al usuario enviar datos y alcanzar rangos extremadamente largos de comunicación a velocidades bajas. Además, proporciona alta inmunidad a interferencias mientras minimiza el consumo de corriente (Dragino, 2020).

El kit de desarrollo Thinxtra, módulo seleccionado para el protocolo Sigfox, cuenta con un conjunto completo de funciones y accesorios que permiten configurar una solución IoT y utilizar la red Sigfox disponible en todo el mundo (Guide, 2018). La Tabla 5 presenta los parámetros de transmisión, cobertura y rendimiento de los módulos de radio seleccionados para cada protocolo.

Tabla 5.*Parámetros de comunicación módulos de transmisión nodos sensores.*

Tecnología	Zigbee	LoRaWAN	Sigfox
Módulo de transmisión	Digi XBee-PRO 900HP	Dragino LoRa Shield v1.2	Thinextra Xkit RC4
Banda de frecuencia	902 a 928 MHz	915 MHz	902 a 928 MHz
Velocidad de datos RF	Hasta 200 Kbps	Hasta 300 Kbps	0,6 Kbps
Alcance en exteriores/línea de vista	6,5 Km	15 Km	30 Km
Potencia de transmisión	+24 dBm - 250 mW	+20 dBm - 100 mW	+22.5 dBm – 178 mW
Sensibilidad del receptor	-101 dBm	-148 dBm	-129 dBm
Antena	Dipolo 2,1 dBi	Omnidireccional 3dBi	Omnidireccional 3dBi

Fuente: (East, 2008)(Dragino, 2020)(Guide, 2018).

A través de estos módulos, los nodos sensores se comunican inalámbricamente hacia una estación base a través de diferentes frecuencias y tasas de datos. La estación base de la red de monitoreo está conformada solamente por dos unidades principales: potencia y Gateway. Al igual que en los nodos sensores, la unidad de potencia contiene un panel solar, una batería recargable, un regulador de carga y adicionalmente un convertidor. La unidad de Gateway la conforma cada dispositivo seleccionado para trabajar correspondientemente en los protocolos Zigbee, LoRaWAN y Sigfox. El Gateway convierte el protocolo inalámbrico de la capa física en protocolos de red IP estándar y luego retransmite la información a un servidor de red central (Córdoba Peñalver, 2017). Las figuras 12, 13 y 14 ilustran los componentes de hardware utilizados en la estación base de la red de monitoreo de precipitaciones.

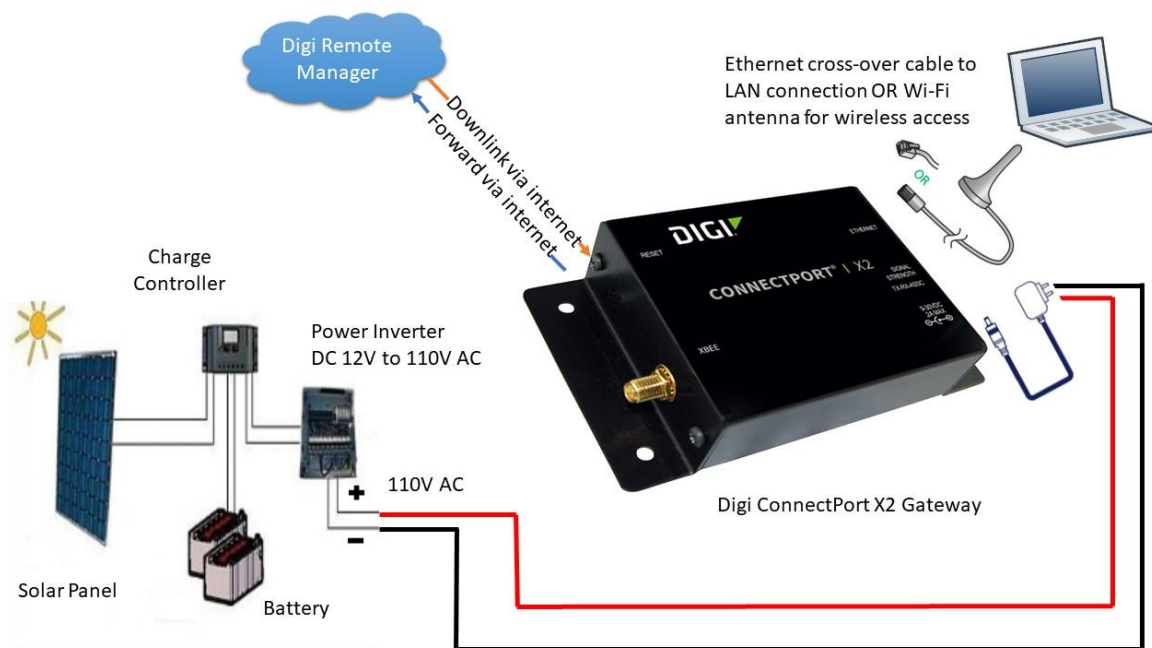


Figura 12. Componentes de hardware estación base red Zigbee. Fuente: propia del autor

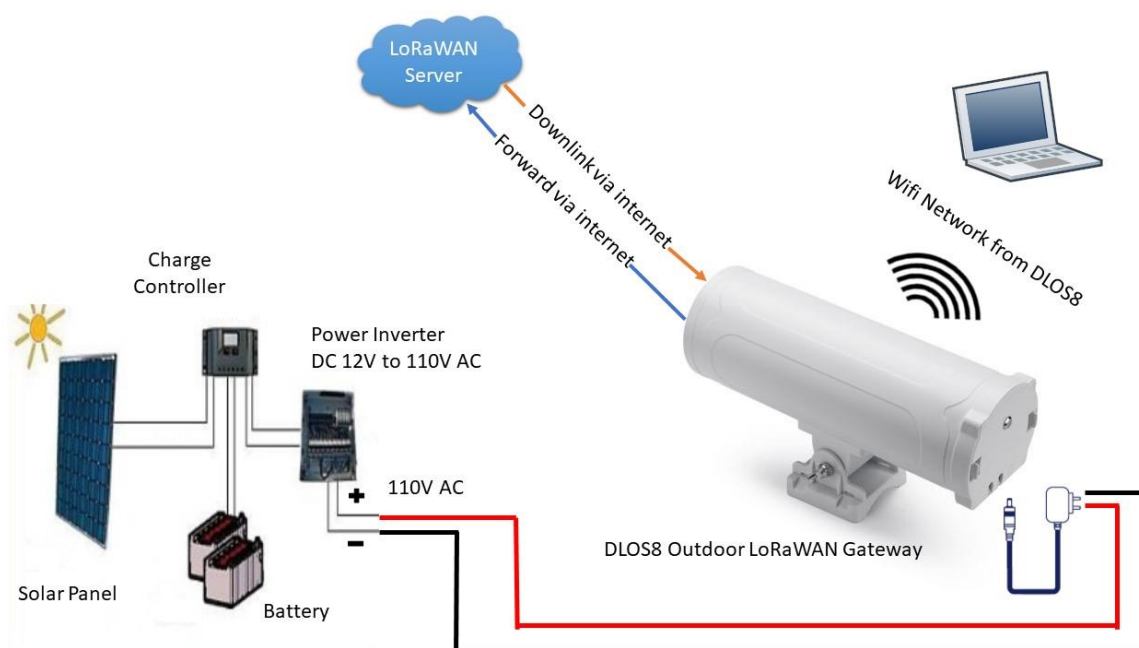


Figura 13. Componentes de hardware estación base red LoRaWAN. Fuente: propia del autor

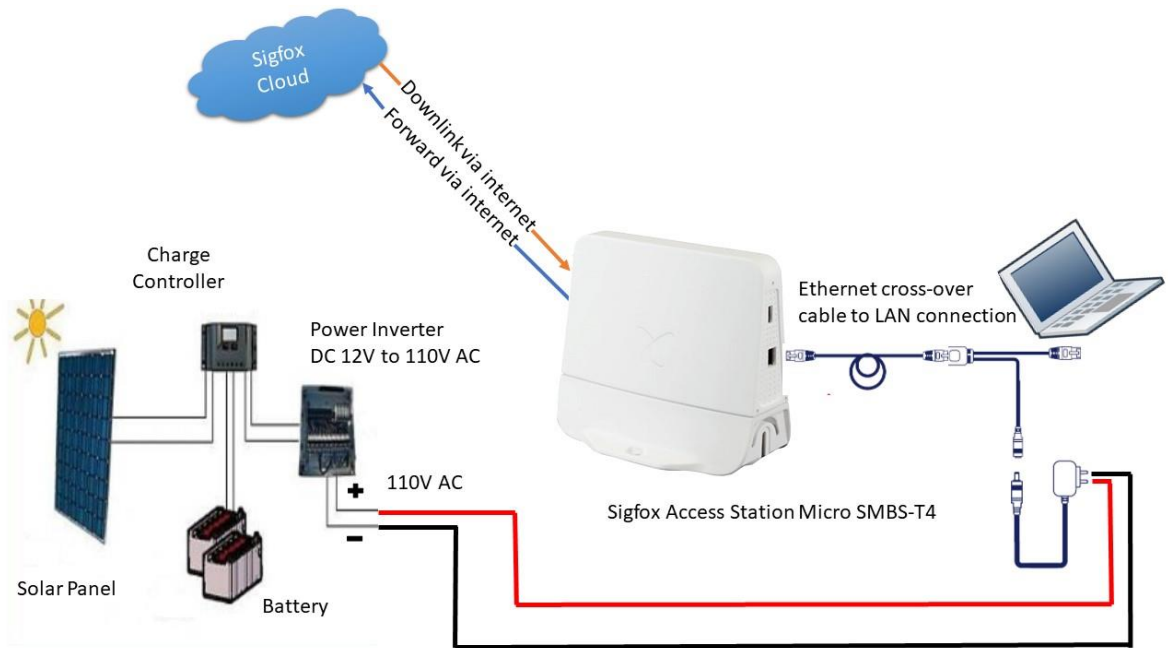


Figura 14. Componentes de hardware estación base red Sigfox. Fuente: propia del autor

El ConnectPort X2 de Digi, seleccionado para el protocolo Zigbee, es una pequeño Gateway XBee a Ethernet que proporciona una red IP de bajo costo para dispositivos RF y redes de sensores. El Gateway ConnectPort X2 puede desplegarse al centro de mando Digi Remote Manager para gestionar su red y obtener información crítica sobre sus dispositivos desplegados. Digi Remote Manager (Digi RM) es una solución basada en la nube que facilita la instalación, configuración, mantenimiento y soporte de dispositivos remotos Digi (Digi International Inc., 2020)

El Gateway escogido para trabajar el protocolo LoRaWAN es el dispositivo DLOS8 de Dragino. El DLOS8 es un Gateway LoRaWAN de código abierto para exteriores que permite conectar una red inalámbrica LoRa a una red IP a través de WiFi, Ethernet, 3G o 4G. El Gateway DLOS8 puede comunicarse con el nodo final LoRaWAN sin necesidad de un servidor propio del protocolo. Puede integrarse con un servicio IoT existente sin

necesidad de configurar un servidor LoRaWAN propio o utilizar un servicio de terceros (DRAGINO, 2020).

A diferencia de los anteriores dispositivos, el Sigfox Access Station Micro, seleccionado para el protocolo Sigfox, es una estación de acceso que opera en un ancho de banda de frecuencia específico utilizado por los dispositivos Sigfox. La estación realiza principalmente operaciones de recepción, pero también es capaz de transmitir información realizando operaciones de downlink a petición del dispositivo. La serie Sigfox Access Station Micro son unidades transceptoras de ultra-ancho alcance y alta linealidad, y cuentan con radio de primera clase y un innovador procesamiento de radio definido por software, para su uso en sistemas de comunicación inalámbrica de banda ultra-estrecha Machine-To-Machine (Sigfox, 2017). Las principales características de los gateways seleccionados para cada protocolo son registradas en la Tabla 6.

Tabla 6.

Características principales gateways seleccionados para cada protocolo.

Tecnología	Zigbee	LoRaWAN	Sigfox
Gateway	Digi Connectport X2	Dragino DLOS8	Sigfox SMBS-T4
Banda de frecuencia	902 a 928 MHz	915 MHz	915 a 928 MHz
Velocidad de datos RF	200 Kbps	300 Kbps	0,6 Kbps
Sensibilidad del Receptor	-101 dBm	-140 dBm	-124 dBm
Antena	External	External	Included
Protección	IP68	IP65	IP65

Fuente: (Digi International Inc., 2020)(DRAGINO, 2020)(Sigfox, 2017).

7.3 Diseño y simulación de radioenlaces

Se utiliza el software Radio Mobile para simular los perfiles de enlace entre los nodos sensores y la estación base de cada protocolo. Radio Mobile es un software libre que utiliza el modelo de terreno irregular Longley-Rice como modelo de radio de propagación en el rango de frecuencias de 20MHz a 20GHz (Zennaro, Bagula, Gascon, & Noveleta, 2010).

El diseño de los radioenlaces mediante esta herramienta permite conocer la ganancia del sistema, las pérdidas totales de comunicación y la potencia mínima de transmisión. Para el levantamiento del mapa de la red y la configuración de las unidades, se toma la información de ubicación de cada uno de los puntos de análisis registrados anteriormente.

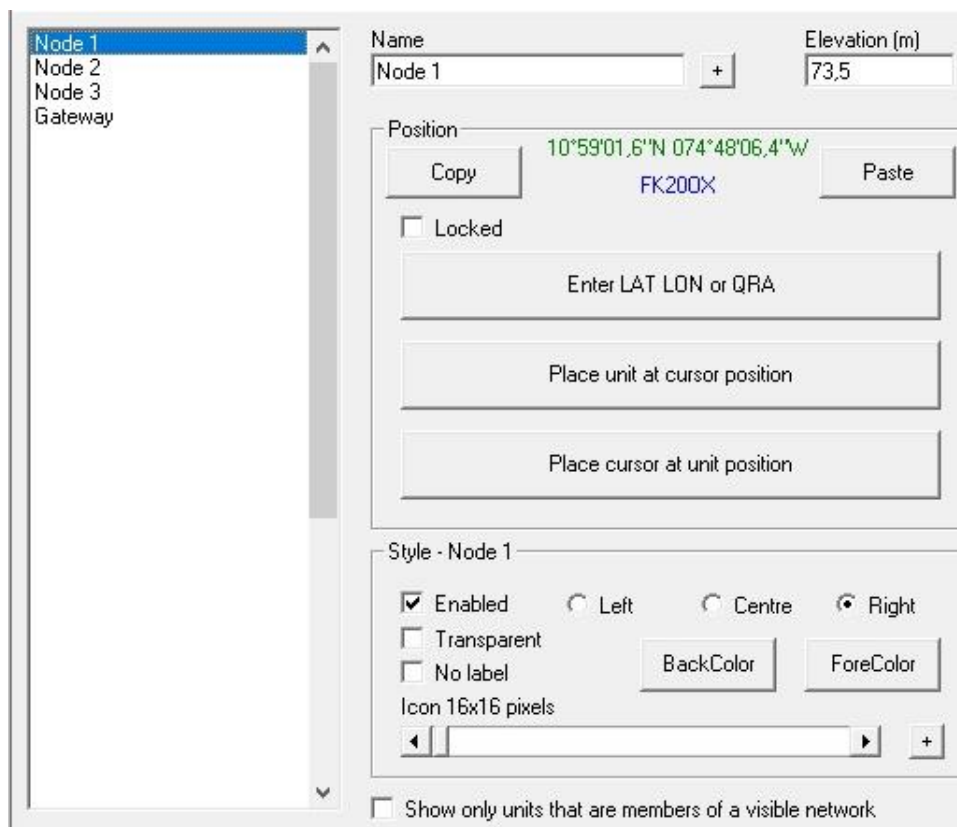


Figura 15. Propiedades de las unidades Radio Mobile. Fuente: propia del autor

En el software Radio Mobile se pueden definir parámetros exclusivos para el diseño de la red, para ello, los parámetros de comunicación de los módulos de transmisión son tomados para realizar la configuración de las propiedades de las redes de cada uno de los protocolos inalámbricos. En el caso de la configuración de las antenas, el programa de

simulación Radio Mobile permite seleccionar y visualizar diferentes tipos que pueden ser utilizadas para el diseño de las redes.

Para la red Zigbee se configuran antenas dipolos de 2,1 dBi a 900MHz, las redes LoRaWAN y Sigfox son configuradas con antenas omnidireccionales de 3dBi a 915MHz. Para las alturas específicas de las antenas se tiene en cuenta la caracterización de los puntos de análisis de la red. Los nodos sensores están situados en una plataforma a 10m sobre el nivel del suelo. El Gateway se encuentra ubicado en la parte superior del bloque doce de la Universidad de la Costa sobre una plataforma a 46m sobre el nivel del suelo.

La topología de red es otra característica importante para la configuración del sistema en el software Radio Mobile. La red de monitoreo de precipitaciones está diseñada a trabajar en una topología estrella, por lo cual el gateway de la estación central es configurado como nodo maestro y los tres nodos sensores se configuran como esclavos.

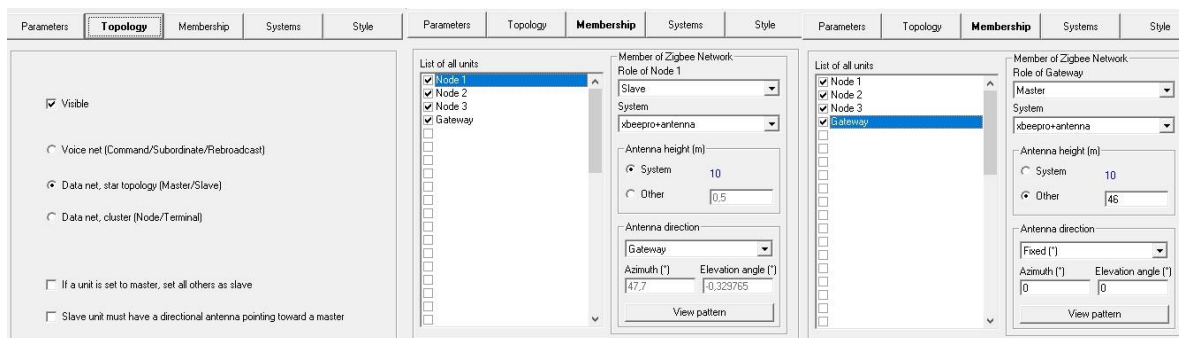


Figura 16. Configuración topología de red. Fuente: propia del autor

Parameters	Topology	Membership	Systems	Style
<div> <div> Net name Zigbee Network Minimum frequency (MHz) 902 Maximum frequency (MHz) 928 Polarization <input checked="" type="radio"/> Vertical <input type="radio"/> Horizontal Mode of variability <input checked="" type="radio"/> Spot % of time 50 <input type="radio"/> Accidental % of locations 50 <input type="radio"/> Mobile % of situations 70 <input type="radio"/> Broadcast </div> <div> Surface refractivity (N-Units) 301 Ground conductivity (S/m) 0.005 Relative ground permittivity 15 Climate <input type="radio"/> Equatorial <input type="radio"/> Continental sub-tropical <input type="radio"/> Maritime sub-tropical <input type="radio"/> Desert <input checked="" type="radio"/> Continental temperate <input type="radio"/> Maritime temperate over land <input type="radio"/> Maritime temperate over sea </div> </div>				
<div> <div> 03 Select from Radiosys03.dat System name xbee-pro+antenna Transmit power (Watt) 0.25 (dBm) 24 Receiver threshold (µV) 1.9953 (dBm) -101 Line loss (dB) 0.02 (Cable+cavities+connectors) Antenna type dipole.ant View Antenna gain (dBi) 2.1 (dBd) -0.05 Antenna height (m) 10 (Above ground) Additional cable loss (dB/m) 0 (If antenna height differs) </div> <div> Add to Radiosys03.dat Remove from Radiosys03.dat </div> </div>				

Figura 17. Propiedades de la red Zigbee. Fuente: propia del autor

Parameters	Topology	Membership	Systems	Style
<div> <div> Net name LoRaWAN Network Minimum frequency (MHz) 902 Maximum frequency (MHz) 915 Polarization <input checked="" type="radio"/> Vertical <input type="radio"/> Horizontal Mode of variability <input checked="" type="radio"/> Spot % of time 50 <input type="radio"/> Accidental % of locations 50 <input type="radio"/> Mobile % of situations 70 <input type="radio"/> Broadcast </div> <div> Surface refractivity (N-Units) 301 Ground conductivity (S/m) 0.005 Relative ground permittivity 15 Climate <input type="radio"/> Equatorial <input type="radio"/> Continental sub-tropical <input type="radio"/> Maritime sub-tropical <input type="radio"/> Desert <input checked="" type="radio"/> Continental temperate <input type="radio"/> Maritime temperate over land <input type="radio"/> Maritime temperate over sea </div> </div>				
<div> <div> 03 Select from Radiosys03.dat System name lorawan+antenna Transmit power (Watt) 0.1 (dBm) 20 Receiver threshold (µV) 0.0089 (dBm) -148 Line loss (dB) 0.02 (Cable+cavities+connectors) Antenna type omni.ant View Antenna gain (dBi) 3 (dBd) 0.85 Antenna height (m) 10 (Above ground) Additional cable loss (dB/m) 0 (If antenna height differs) </div> <div> Add to Radiosys03.dat Remove from Radiosys03.dat </div> </div>				

Figura 18. Propiedades de la red LoRaWAN. Fuente: propia del autor

The image displays two side-by-side screenshots of the NetSim software interface, specifically the configuration windows for a Sigfox network.

Left Screenshot (Parameters tab):

- Net name:** Sigfox Network
- Surface refractivity (N-Units):** 301
- Ground conductivity (S/m):** 0.005
- Relative ground permittivity:** 15
- Minimum frequency (MHz):** 902
- Maximum frequency (MHz):** 928
- Polarization:** Vertical (selected), Horizontal
- Mode of variability:** Spot (% of time: 50), Accidental (% of locations: 50), Mobile (% of situations: 70), Broadcast
- Climate:** Equatorial, Continental sub-tropical, Maritime sub-tropical, Desert, Continental temperate (selected), Maritime temperate over land, Maritime temperate over sea

Right Screenshot (Systems tab):

- System name:** sigfox+antenna
- Transmit power (Watt):** 0.1778279 (dBm: 22.5)
- Receiver threshold (µV):** 0.0794 (dBm: -129)
- Line loss (dB):** 0.02 (Cable+cavities+connectors)
- Antenna type:** omni.ant (View button)
- Antenna gain (dBi):** 3 (dBd: 0.85)
- Antenna height (m):** 10 (Above ground)
- Additional cable loss (dB/m):** 0 (If antenna height differs)
- Buttons:** Add to Radiosys03.dat, Remove from Radiosys03.dat

Figura 19. Propiedades de la red Sigfox. Fuente: propia del autor

Después de haber realizado todas las configuraciones de red, se evalúan las propiedades de los perfiles de enlace dando como resultado radioenlaces estables y factibles para todos los protocolos inalámbricos. Se realiza el estudio total del comportamiento de las redes Zigbee, LoRaWAN y Sigfox con ayuda de la conexión existente entre los softwares libres Radio Mobile y Google Earth. Las figuras 20 y 21 muestran la simetría y viabilidad de los enlaces de radio entre los nodos sensores y el Gateway de todas las redes.

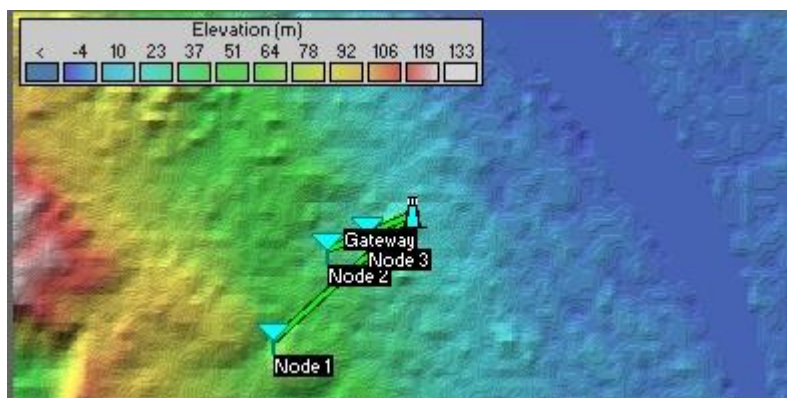


Figura 20. Red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones Radio Mobile. Fuente: propia del autor

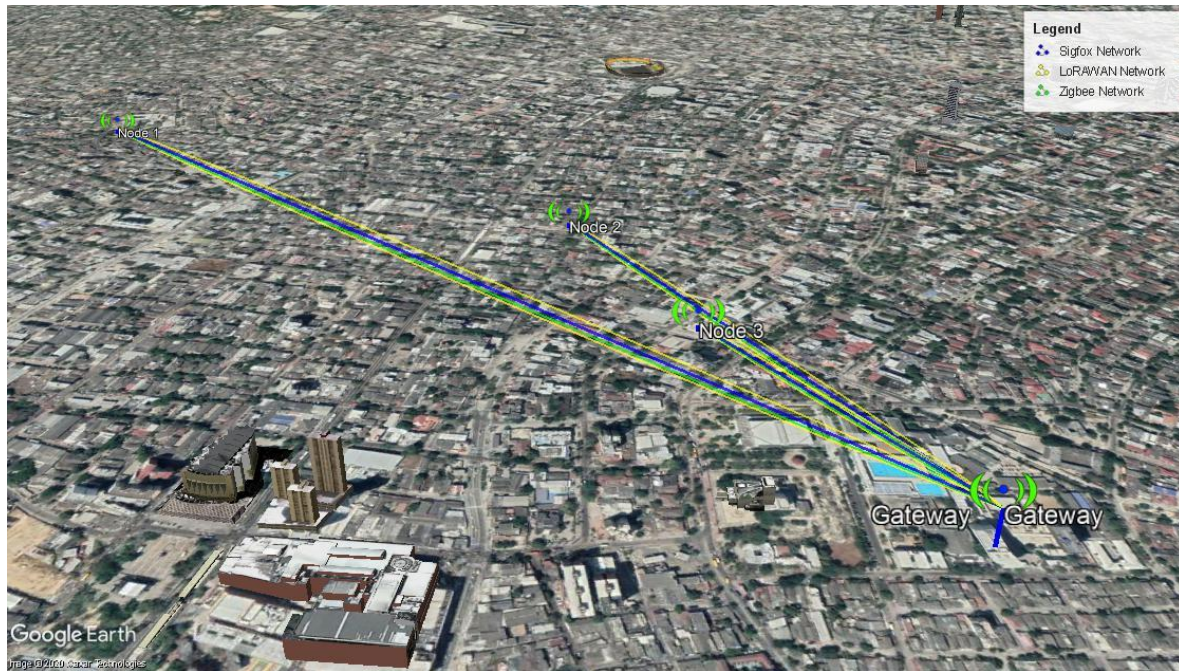


Figura 21. Redes de monitoreo conexión Google Earth - Radio Mobile. Fuente: propia del autor

Mediante Radio Mobile se pueden evaluar individualmente los perfiles de enlace de comunicación entre los nodos sensores y el Gateway de cada una de las redes. En los enlaces de radio generados podemos encontrar parámetros de pérdida de espacio libre, obstrucción, pérdida total de propagación, Nivel de Rx y Ganancia del sistema. Las figuras 22, 23 y 24 ilustran los perfiles de enlace de las redes Zigbee, LoRaWAN y Sigfox. Toda la información obtenida de los parámetros y características de los radioenlaces es registrada en la Tabla 7.

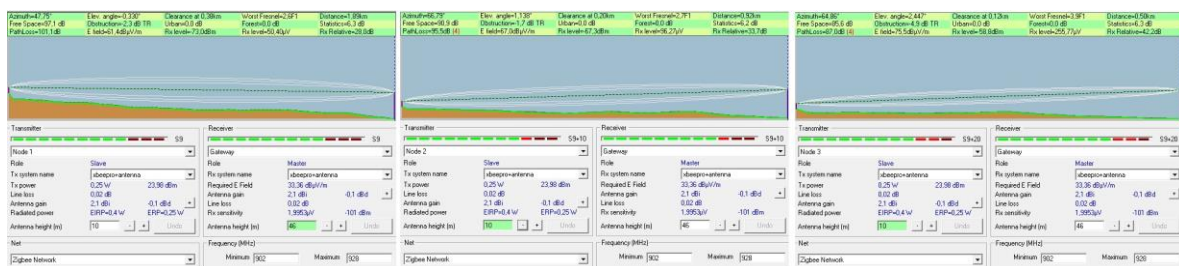


Figura 22. Perfiles de enlace red Zigbee. Fuente: propia del autor

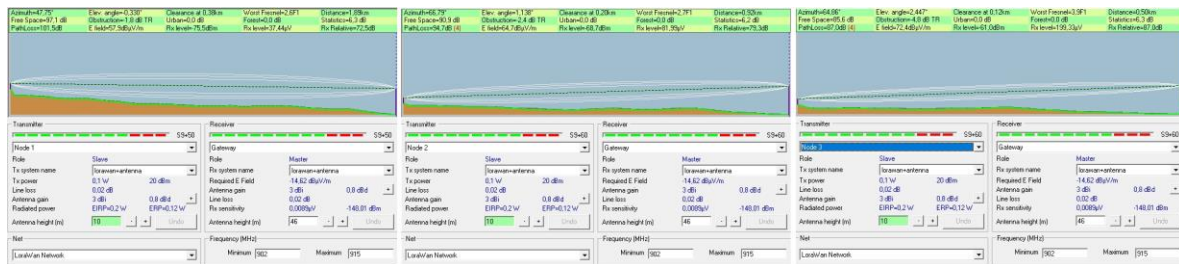


Figura 23. Perfiles de enlace red LoRaWAN. Fuente: propia del autor



Figura 24. Perfiles de enlace red Sigfox. Fuente: propia del autor

Tabla 7.

Parámetros de comunicación perfiles de enlace.

Red	Zigbee			LoRaWAN			Sigfox		
Parámetro	Nodo 1 a Gateway	Nodo 2 a Gateway	Nodo 3 a Gateway	Nodo 1 a Gateway	Nodo 2 a Gateway	Nodo 3 a Gateway	Nodo 1 a Gateway	Nodo 2 a Gateway	Nodo 3 a Gateway
Frecuencia (MHz)	915	915	915	908,5	908,5	908,5	915	915	915
Espacio libre (dB)	97,1	90,9	85,6	97,1	90,9	85,6	97,1	90,9	85,6
Obstrucción (dB)	-2,3	-1,7	-4,9	-1,8	-2,4	-4,8	-2,3	-1,7	-4,9
Estadísticas (dB)	6,3	6,2	6,3	6,3	6,2	6,3	6,3	6,2	6,3
Perdida de trayectoria (dB)	101,1	95,5	87,0	101	94,7	87,0	101,1	95,5	87,0
Rx level (dBm)	-73,0	-67,3	-58,8	-75,5	-68,7	-61,0	-72,6	-67,0	-58,5
Ganancia del sistema (dB)	129,1	129,1	129,1	174,0	174,0	174,0	157,5	157,5	157,5

Fuente: propia del autor

8. Análisis y Evaluación de Resultados

En este capítulo se evalúa el rendimiento de los protocolos Zigbee, LoRaWAN y Sigfox, realizando el análisis y evaluación de las caracterizaciones tecnológicas de cada una de las redes y los datos obtenidos de sus perfiles de enlace simulados mediante el software Radio Mobile. La evaluación se basa en el comportamiento de las tecnologías en términos de comunicación, consumo energético y costo monetario. Para ejecutar la evaluación en términos de comunicación, se toma como base los perfiles de enlace resultantes de la comunicación entre los nodos sensores y la estación base de cada una de las redes establecidas. En el caso del análisis energético y el análisis de costo monetario, se fundamenta en las características de los dispositivos seleccionados para el desarrollo de las redes de cada uno de los protocolos.

8.1 Análisis de comunicación de los Radioenlace

Para el correcto funcionamiento de una red se deben tener en cuenta los parámetros que controlan el rendimiento de cada enlace individual que la conforma. Los parámetros esenciales son la intensidad de la señal recibida, las pérdidas totales de trayectoria, el ruido que acompaña a la señal recibida y cualquier deterioro adicional del canal más allá de la atenuación, como multitrayecto o interferencia. Los perfiles de enlace dependen de muchos factores, la modulación utilizada, la potencia transmitida, la ganancia neta de la antena y las pérdidas de trayectoria (Seybold, 2005).

Para un presupuesto de enlace se tiene en cuenta la potencia isotrópica radiada efectiva del transmisor (EIRP) y todas las pérdidas en el enlace antes del receptor. El margen del enlace se obtiene comparando la intensidad de la señal recibida esperada con la sensibilidad o el umbral del receptor (Seybold, 2005).

El margen del enlace corresponde a la diferencia entre el valor de la señal recibida y la sensibilidad del receptor. La potencia isotrópica radiada efectiva del transmisor (EIRP) es la potencia máxima permitida para ser enviada al espacio abierto en un área específica (Buettrich, 2007). La potencia isotrópica radiada efectiva del transmisor (EIRP) y el margen del enlace se pueden expresar de la siguiente manera

$$EIRP = P_{Tx} + G_{Tx} \quad (1)$$

Donde,

P_{Tx} es la potencia de transmisión en dBm

G_{Tx} es la ganancia de la antena de transmisión en dB

$$\text{Margen de enlace} = EIRP - L_{Total} + G_{Rx} - TH_{Rx} \quad (2)$$

Donde,

$EIRP$ es la potencia isotrópica radiada efectiva en dBW o dBm

L_{Total} es la pérdida total del trayecto, incluyendo pérdidas diversas, reflexiones y márgenes de desvanecimiento en dB

G_{Rx} es la ganancia de recepción en dB

TH_{Rx} es el umbral de recepción o la sensibilidad de recepción en dBW o dBm

El margen de enlace disponible depende de muchos factores, el tipo de modulación utilizada, la potencia transmitida, la ganancia neta de la antena, cualquier pérdida de guía de ondas o de cable entre el transmisor y la antena, la pérdida del radomo y, lo más

importante, la pérdida del trayecto. Las ganancias de la antena, las pérdidas de transmisión y la potencia transmitida afectan directamente al presupuesto del enlace.

La pérdida de trayecto es el factor más significativo debido a su magnitud en relación con los otros términos. Los elementos de pérdida de trayecto incluyen la pérdida en el espacio libre, las pérdidas atmosféricas debidas a la absorción de gases y vapor de agua, la precipitación, la pérdida por desvanecimiento debido a la multitrayectoria y otros efectos diversos basados en la frecuencia y el entorno.

En un trayecto dado, la variación en un período de tiempo de la pérdida en el trayecto puede ser grande, por lo que se debe considerar un margen adecuado para asegurar un enlace estable y de calidad durante condiciones climáticas adversas u otras anomalías atmosféricas. Un margen de 10 a 15 dB es lo típico en condiciones normales, pero en presencia de ruido en la señal recibida, se debe tener un margen del orden de 20 dB. En áreas urbanas donde hay muchos radioenlaces operando es común encontrar altos niveles de ruido. Por lo tal en esos escenarios se requiere un margen aun mayor (Monachesi et al., 2016). Los parámetros de presupuesto de enlace de cada uno de los perfiles realizados son registrados en la tabla 8.

Tabla 8.

Parámetros de presupuesto de enlace.

Red	Zigbee			LoRaWAN			Sigfox		
Parámetro	Nodo 1 a Gateway	Nodo 2 a Gateway	Nodo 3 a Gateway	Nodo 1 a Gateway	Nodo 2 a Gateway	Nodo 3 a Gateway	Nodo 1 a Gateway	Nodo 2 a Gateway	Nodo 3 a Gateway
Potencia de transmisión (dBm)	23,98	23,98	23,98	20	20	20	22,5	22,5	22,5
Ganancia transmisión antena (dB)	2,1	2,1	2,1	3	3	3	3	3	3
EIRP (dB)	26,08	26,08	26,08	23	23	23	25,5	25,5	25,5
Pérdida de trayectoria (dB)	101,1	95,5	87,0	101	94,7	87,0	101,1	95,5	87,0

Sensibilidad del receptor (dBm)	-101	-101	-101	-148,01	-148,01	-148,01	-129	-129	-129
Ganancia recepción antena (dB)	2,1	2,1	2,1	3	3	3	3	3	3
Margen de enlace (dB)	28,08	33,68	42,18	73,01	79,31	87,01	56,4	62	70,5

Fuente: propia del autor

En términos de margen, todos los radioenlaces desarrollados cumplen con los requisitos necesarios para asegurar su estabilidad y calidad con presencia de ruido en zonas urbanas. Comparando los valores de margen de enlace registrados en la Tabla 8, los radioenlaces correspondientes a la red LoRaWAN poseen los márgenes más altos. Los márgenes obtenidos se atribuyen a la técnica de modulación LoRa utilizada por los dispositivos seleccionados capaces alcanzar una sensibilidad de recepción más de -148dBm.

Otro aspecto importante de los resultados de las simulaciones de radio, es la intensidad de la señal de radio recibida de los perfiles de enlace como parte fundamental de los informes de medición de la red (NMR). La intensidad de la señal de radio recibida se mide como Rx-Level y se informa en un rango de 0 a 64. El Rx-Level es el nivel de la señal por encima de -110 dBm. Un Rx-Level 30 es: $-110 + 30 \text{ dB} = -80 \text{ dBm}$ (Kadhim & Salih, 2014). La Tabla 9 muestra el rango de intensidad de la señal de radio recibida en valores de dBm.

Tabla 9.

Rango de intensidad de la señal de radio recibida.

<i>RX level (dBm)</i>	<i>Fuerza</i>
-120 a -95	Pobre
-95 a -83	Buena
-85 a -70	Muy Buena

-70 a -10 | Excelente
 Fuente: (Kadhim & Salih, 2014)

De acuerdo con la tabla 7, todos los enlaces simulados mediante el software Radio Mobile son viables y fuertes para cada una de las redes inalámbricas y cumplen con los requisitos de red establecidos. En función de los valores de Rx-Level de cada enlace, los radioenlaces de la red Sigfox obtienen una mayor intensidad de radio recibida. Por otro lado, los enlaces con menor intensidad de señal recibida fueron los correspondientes a la red LoRaWAN, sin embargo, la variación de valores con la red Sigfox se encuentra en el rango de 3 - 4 dBm.

8.2 Análisis energético

En todos los sistemas de monitoreo el consumo de energía suele ser una de las principales preocupaciones para que el sistema funcione correctamente. Si un nodo sensor deja de transmitir, faltarían datos relacionados con su área de monitoreo y el sistema dejaría de tener información precisa. Los requisitos de energía de cada componente deben examinarse cuidadosamente para optimizar el consumo energético del sistema (Sadowski & Spachos, 2020). Parámetros como la tensión de suministro, la corriente de transmisión y las corrientes en reposo y recepción son importantes para medir el consumo de energía de un dispositivo. Las Tablas 10 y 11 resumen el análisis del consumo energético de los dispositivos utilizados en las redes de cada una de las tecnologías.

Tabla 10.

Parámetros de potencia módulos de transmisión nodos sensores.

Tecnología	Zigbee	LoRaWAN	Sigfox
Módulo de transmisión	Digi XBee-PRO 900HP	Dragino LoRa Shield v1.2	Thinextra Xkit RC4
Tensión de alimentación	2.1 to 3.6 VDC	3.3 VDC	2.7 to 3.6 VDC

Corriente de transmisión	215 mA	120 mA	200 mA
Corriente de recepción	29 mA	10.8 mA	32 mA
Corriente de reposo	2.5 uA	1 uA	2.5 uA

Fuente: propia del autor

Tabla 11.

Parámetros de potencia Gateway estación base.

Tecnología Gateway	Zigbee Digi Connectport X2	LoRaWAN Dragino DLOS8	Sigfox Sigfox SMBS-T4
Entrada de alimentación	9 - 30 VDC	12 - 24 VDC	11 - 26 VDC
Alimentación	12 VDC	12 VDC	12 VDC
Consumo de energía	1.2 W, Max: 3.4 W	3.6 W, Max: 6 W	2.3 W, Max: 7.5 W

Fuente: propia del autor

De acuerdo con las tablas 10 y 11, los dispositivos LoRaWAN tienen una mayor eficiencia energética debido a su bajo consumo en la transmisión de datos de los nodos sensores, sin embargo, el Gateway Zigbee tiene un menor consumo de energía que LoRaWAN y Sigfox.

8.3 Análisis de costos

Los costos monetarios de la implementación de la red inalámbrica es uno de los criterios fundamentales al momento de establecer la tecnología adecuada para el diseño del sistema de monitoreo. Una implementación sencilla y de menor costo, ahorra tiempo de configuración del sistema y facilitar la depuración y reemplazo de algún dispositivo en el caso que se presentara algún inconveniente.

Los nodos sensores de los sistemas diseñados cuentan con las mismas unidades de potencia, sensor y microcontrolador para todas las tecnologías inalámbricas establecidas. En el caso de la estación base, todas las redes comparten la misma unidad de potencia. La

diferencia en los costos de las redes se encuentra en los dispositivos utilizados para la transmisión de datos en los nodos sensores y los Gateway seleccionados en las estaciones base. La Tabla 12 expone la comparación de costos de los equipos utilizados para cada una de las tecnologías inalámbricas. Se considera el precio unitario por componente.

Tabla 12.

Costos dispositivos de comunicación Zigbee, LoRaWAN y Sigfox.

Tecnología	Zigbee		LoRaWAN		Sigfox	
	Dispositivo	Costo	Dispositivo	Costo	Dispositivo	Costo
Módulo de transmisión	Digi XBee-PRO 900HP	\$44.50	Dragino LoRa Shield v1.2	\$24.49	Thinextra Xkit RC4	\$36.25
Antena	Antenna - 900 MHz, half wave dipole, 2.1 dBi	\$20	915MHz ISM, RF Antenna 903MHz ~ 928MHz 3dBi	\$10	915MHz ISM, RF Antenna 903MHz ~ 928MHz 3dBi	\$10
Gateway	Digi Connectport X2	\$183.75	Dragino DLOS8	\$320.07	Sigfox SMBS-T4	\$457.50

Fuente: propia del autor

En el caso de la red Sigfox, las redes desplegadas bajo este protocolo desde su concepción aparecen con un modelo de Red Pública, en este caso uno o varios operadores de red brindan cobertura a sus usuarios y estos únicamente pagan un valor de suscripción definido. Además, se debe tener en cuenta que esta red permite enviar un máximo de 140 mensajes al día, lo cual puede ser un limitante para el sistema de monitoreo.

En Colombia el operador WND es quien brinda cobertura en todo el país y está en constante expansión de cobertura de la red. Para adquirir el servicio se deben tener desplegados los dispositivos a utilizar y comprar una suscripción anual por cada uno de ellos. El precio de suscripción anual es de aproximadamente 10 dólares por dispositivo.

Debido a lo anterior, la red Sigfox no cumple con los requerimientos económicos del sistema de monitoreo de precipitaciones por su limitante en los planes de suscripción. Por consiguiente, esta red es descartada y solo se tienen en cuenta los costos económicos de los dispositivos desplegados en las redes LoRaWAN y Zigbee.

De acuerdo a la tabla 12, el módulo de transmisión utilizado en la tecnología LoRaWAN es el de menor costo para la transmisión de datos en los nodos sensores del sistema. Para la estación base el Gateway de menor costo es el utilizado en la red Zigbee. En general, la red LoRaWAN es la que ofrece la mejor relación costo-beneficio apoyados en las características ofrecidas por los dispositivos utilizados para su despliegue.

9. Conclusiones

En el presente trabajo investigativo se evaluaron los protocolos de comunicación Zigbee, LoRaWAN y Sigfox en términos de comunicación, consumo energético y costos de los dispositivos, para determinar cuál es la tecnología más adecuada para sustituir al protocolo de comunicaciones GPRS utilizado en la red de monitoreo de precipitaciones en una zona urbana debido a su alto consumo de energía y su elevado costo de mantenimiento.

Para la evaluación se diseñó una red para cada una de las tecnologías seleccionadas utilizando los puntos de medición de la red GPRS y se utilizó el software libre Radio Mobile para simular los perfiles de enlace establecidos.

En términos de comunicación, la red Sigfox presenta la mayor intensidad de señal de radio recibida y la red LoRaWAN obtiene los mejores márgenes de perfil. Del mismo modo, los dispositivos con menor consumo de energía fueron los utilizados en la red LoRaWAN. En el ámbito económico, la red Sigfox es descartada por su limitante en los planes de suscripción anual por despliegue de sus dispositivos y su envío máximo de 140 mensajes al día. Así, para la transmisión de datos en los nodos sensores, los módulos de la red LoRaWAN son los de menor costo del sistema y para la estación base el Gateway de menor costo es el utilizada en la red Zigbee.

Teniendo en cuenta cada uno de los parámetros, se puede concluir que la tecnología LoRaWAN es la más adecuada para la red de monitoreo de precipitaciones en zonas urbanas. Asimismo, la alta sensibilidad combinada con el amplificador de potencia integrado de los dispositivos LoRaWAN, produce un presupuesto de enlace líder en la evaluación en términos de comunicación, consumo de energía y costos de implementación.

9.1 Trabajos futuros

A partir de la actual investigación se ha determinado el protocolo de comunicación más adecuado en términos de comunicación, consumo energético y costos de los dispositivos para una red inalámbrica de monitoreo de precipitaciones en la ciudad de Barranquilla.

Como trabajo posterior se puede implementar físicamente la red diseñada y realizar pruebas que permitan redefinir y ajustar los parámetros de comunicación del sistema. De igual forma se puede anexar la parte de procesamiento de datos del servidor de la estación base utilizando las plataformas IoT que ofrece el protocolo seleccionado.

Referencias

- Acosta-Coll, M., Ballester-Merelo, F., & Martínez-Peiró, M. (2018). Early warning system for detection of urban pluvial flooding hazard levels in an ungauged basin. *Natural Hazards*, 92(2), 1237–1265. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3249-4>
- Acosta Coll, M. (2013). Sistemas de Alerta Temprana (S.A.T) para la Reducción del Riesgo de Inundaciones Súbitas y Fenómenos Atmosféricos en el Área Metropolitana de Barranquilla. *Scientia et Technica*, 18(2), 303–308. <https://doi.org/10.22517/23447214.8661>
- Albero, T., Sempere, V., Silvestre, J., & Dabbas, P. (2005). Environmental control system based on mobile devices. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, 1 2 VOLS*(November 2015), 831–838. <https://doi.org/10.1109/etfa.2005.1612612>
- Alliance, L. (2020). *LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification*. 1–75.
- Ávila, H. (2012). Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia*. *Revista de Ingeniería*, (36), 54–59. <https://doi.org/10.16924/revinge.36.10>
- Avila, L., Ávila, H., & Sisa, A. (2017). A reactive early warning model for urban flash flood management. *World Environmental and Water Resources Congress 2017: Water, Wastewater, and Stormwater; Urban Watershed Management; and Municipal Water Infrastructure - Selected Papers from the World Environmental and Water Resources Congress 2017*, (August), 372–382. <https://doi.org/10.1061/9780784480632.030>
- Balmaceda, J., Aubert, J., & Arias, M. R. (2018). Performance analysis of radio link implementation for low cost deployed WiMAX networks. *2017 IEEE 37th Central*

America and Panama Convention, CONCAPAN 2017, 2018-Janua, 1–5.

<https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2017.8278516>

Bernal, H. A. T. (2020). *Análisis De Tecnologías De Comunicaciones Inalámbricas Para Determinar La Mejor Opción a Implementar Para Los Servicios Que Presta La Ditg-Eaab*. Retrieved from <http://www.elsevier.com/locate/scp>

Bhoyar, P., Sahare, P., Dhok, S. B., & Deshmukh, R. B. (2019). Communication technologies and security challenges for internet of things: A comprehensive review. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 99, 81–99.

<https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.11.031>

Bonilla, I., Arturo, T., & Morles, M. (2016). Iot, El Internet De Las Cosas Y La Innovación De Sus Aplicaciones. *Vinculatégica EFAN*, (1), 2313–2340. Retrieved from <http://www.web.facpya.uanl.mx/Vinculategica/Revistas/R2/2313-2340 - Iot, El Internet De Las Cosas Y La Innovacion De Sus Aplicaciones.pdf>

Buettrich, S. (2007). *Unidad 06 Unidad 06: : Cálculo de Radioenlace Cálculo de Radioenlace Tabla de contenido*. 1–22. Retrieved from http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/06_es_calculo-de-radioenlace_guia_v02.pdf

CAE S.p.A. (2021). PRECIPITACIONES INTENSAS. Retrieved April 19, 2020, from <https://www.cae.it/esp/soluciones/sistemas-de-monitoreo-para-eventos-meteorológicos-extremos/precipitaciones-intensas-sl-10.html>

Caicedo Ortiz, J. G. (2015). Modelo de despliegue de una WSN para la medición de las variables climáticas que causan fuertes precipitaciones. *Prospectiva*, 13(1), 106. <https://doi.org/10.15665/rp.v13i1.365>

- Cama-Pinto, A., Acosta-Coll, M., Piñeres-Espitia, G., Caicedo-Ortiz, J., Zamora-Musa, R., & Sepulveda-Ojeda, J. (2016). Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(4), 581–599.
<https://doi.org/10.4067/s0718-33052016000400005>
- Digi International Inc. (2020). *ConnectPort® X2 - Digi International*. Retrieved from <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/gateways/connectportx2gateways>
- Dragino. (2020). Lora Shield. Retrieved from Wiki for Dragino Project website:
http://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield
- DRAGINO. (2020). *Outdoor LoRaWAN Gateway OVERVIEW : 1.0(8)*, 86647123.
- Dulman, S., Chatterjea, S., & Havinga, P. (2005). Introduction to wireless sensor networks. *Embedded Systems: Handbook*, (c), 31-1-31–10.
<https://doi.org/10.1201/9781420038163>
- East, B. R. (2008). *9XTend™ OEM RF Module*. 1–2.
- Garcia, F. C. C., Retamar, A. E., & Javier, J. C. (2016). A real time urban flood monitoring system for metro Manila. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON, 2016-Janua*, 3–7.
<https://doi.org/10.1109/TENCON.2015.7372990>
- García Garrancho, P. (2006). *Manuel de uso de Radio Mobile*. 31. Retrieved from [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6989/anexos/Anexo 16.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6989/anexos/Anexo%2016.pdf)
- Guide, I. (2018). *XKIT INSTRUCTION*. (April).
- Hua, J., & Shunwuritu, N. (2021). Research on term extraction technology in computer field

based on wireless network technology. *Microprocessors and Microsystems*, 80(September 2020), 103336. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103336>

IP Europe. (2019). What are cellular communication standards ? Retrieved April 26, 2021, from IP-Europe-Factsheet website: <https://www.iptalks.eu/policy-priorities/support-the-open-standards-development-model/what-are-cellular-communication-standards/>

ITU-T. (2014). Applications of Wireless Sensor Networks in Next Generation Networks. *Series T.2000: Next Generation Networks*, (February), 1–94.

Javier, F., Pisón, M. De, Marcos, A. G., & Elías, F. A. (2009). *Redes inalámbricas de sensores : teoría y aplicación práctica* Roberto Fernández Martínez , Joaquín Ordieres Meré ,.

Kadhim, L. A., & Salih, S. M. (2014). Indoor Distributed Antenna System for the University of Baghdad Building. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 5(4), 57–68.

Kama, A., Diallo, M., & Drame, M. S. (2018). Low cost connected and autonomous rain gauge for real time rainfall monitoring in Dakar. *2018 25th International Conference on Telecommunications, ICT 2018*, 660–664. <https://doi.org/10.1109/ICT.2018.8464854>

Koucheryavy, A., & Salim, A. (2009). Cluster head selection for homogeneous wireless sensor networks. *International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT*, 3(3), 2141–2146.

Lavric, A., Petrariu, A. I., & Popa, V. (2019). SigFox Communication Protocol: The New Era of IoT? *2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era, ISSI 2019*, 2019–2022. <https://doi.org/10.1109/ISSI47111.2019.9043727>

- Lee, J. S., Su, Y. W., & Shen, C. C. (2007). A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, (September 2014), 46–51. <https://doi.org/10.1109/IECON.2007.4460126>
- Li, W., & Kara, S. (2017). Methodology for Monitoring Manufacturing Environment by Using Wireless Sensor Networks (WSN) and the Internet of Things (IoT). *Procedia CIRP*, 61, 323–328. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.182>
- LoRa Alliance. (2015). *A technical overview of LoRa and LoRaWAN*. (November), 1–20. Retrieved from <https://www.lora-alliance.org/portals/0/documents/whitepapers/LoRaWAN101.pdf>
- Mangundu, E. M., Mateus, J. N., Zodi, G. A. L., & Johson, J. (2018). A wireless sensor network for rainfall monitoring, using cellular network: A case for Namibia. *2017 Global Wireless Summit, GWS 2017, 2018-Janua*, 240–244. <https://doi.org/10.1109/GWS.2017.8300469>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>
- Mendoza, A., González, H., Buelvas, J., & Rueda, S. L. M. (2016). *Guía para la Implementación de Sistemas de alerta temprana*. Retrieved from <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/18505/VOL-9-GUIA-PARA-LA-IMPLEMENTACION-DE-SISTEMAS-DE-ALETA-TEMPRANA.pdf?sequence=18>
- Monachesi, E., Gómez López, F. A., Carrasco, A., Frenzel, A. M., Chaile, G., & Tucumán, F. R. (2016). *Estudio de viabilidad de un enlace WiFi*. Retrieved from

<http://www.edutecne.utn.edu.ar>

Noaa. (2012). *Guía de referencia para sistemas de alerta temprana de crecidas repentinas*.

Retrieved from

http://www.meted.ucar.edu/communities/hazwarnsys/ffewsrg_es/FFG_completa_es.pdf

Organización Meteorológica Mundial. (1994). *GUÍA DE PRACTICAS HIDROLÓGICAS*.

Retrieved from

https://www.wmo.int/pages/prog/hwarp/publications/guide/spanish/168_Vol_I_es.pdf

Rueda, J. S., & Talavera Portocarrero, J. M. (2017). Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora. *Revista Colombiana de Computación*, 18(2), 58–74. <https://doi.org/10.29375/25392115.3218>

Sadowski, S., & Spachos, P. (2020). Wireless technologies for smart agricultural monitoring using internet of things devices with energy harvesting capabilities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172(September 2019), 105338.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105338>

Santos, S. C., Firmino, R. M., Mattos, D. M. F., & Medeiros, D. S. V. (2020). *An IoT Rainfall Monitoring Application based on Wireless Communication Technologies*. 53–56.

<https://doi.org/10.1109/ciot50422.2020.9244293>

Seybold, J. S. (2005). Introduction to RF Propagation. In *Introduction to RF Propagation*.

<https://doi.org/10.1002/0471743690>

Sigfox. (2017). *Sigfox Technical Overview*. 1(May), 26. Retrieved from

<https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>

- Sohraby, K., Minoli, D., & Znati, T. (2007). Basic Wireless Sensor Technology. In *Wireless Sensor Networks*. <https://doi.org/10.1002/9780470112762.ch3>
- Talavera, J. M., Tobón, L. E., Gómez, J. A., Culman, M. A., Aranda, J. M., Parra, D. T., ... Garreta, L. E. (2017). Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142(September), 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.015>
- Trandafir, B., Fratu, O., & Halunga, S. (2010). Simulation and analysis of a Wi-Fi public network using the radio mobile software. *2010 9th International Symposium on Electronics and Telecommunications, ISETC'10 - Conference Proceedings*, 281–284. <https://doi.org/10.1109/ISETC.2010.5679309>
- Vitadhani, A., Alief, F., Haryanto, B., Harwahyu, R., & Fitri Sari, R. (2020). Simulating LoRaWAN for flood early warning system in ciliwung river, bogor-Jakarta. *Proceedings - 2020 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication: IT Challenges for Sustainability, Scalability, and Security in the Age of Digital Disruption, ISemantic 2020*, 274–279. <https://doi.org/10.1109/iSemantic50169.2020.9234221>
- Yuwono, T., Ruzardi, & Ismail, M. (2011). Rain gauge development employing bluetooth and RF modem. *2011 IEEE International Conference on Space Science and Communication: "Towards Exploring the Equatorial Phenomena", IconSpace 2011 - Proceedings*, (July), 320–323. <https://doi.org/10.1109/IConSpace.2011.6015909>
- Zand, P., Chatterjea, S., Ketema, J., & Havinga, P. (2012). A distributed scheduling algorithm for real-time (D-SAR) industrial wireless sensor and actuator networks. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*.

<https://doi.org/10.1109/ETFA.2012.6489719>

Zennaro, M., Bagula, A., Gascon, D., & Noveleta, A. B. (2010). Long distance wireless sensor networks: Simulation vs reality. *Proceedings of the 4th ACM Workshop on Networked Systems for Developing Regions, NSDR '10*, (June 2014).

<https://doi.org/10.1145/1836001.1836013>